



Contribution à l'étude expérimentale et numérique de coronographes stellaires : instrument VLT-SPHERE et 1er coronographe au Dôme C

Géraldine Guerri

► To cite this version:

Géraldine Guerri. Contribution à l'étude expérimentale et numérique de coronographes stellaires : instrument VLT-SPHERE et 1er coronographe au Dôme C. Astrophysique [astro-ph]. Université Nice Sophia Antipolis, 2008. Français. NNT : . tel-00511065

HAL Id: tel-00511065

<https://theses.hal.science/tel-00511065>

Submitted on 23 Aug 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à l'étude expérimentale et numérique de coronographes stellaires : instrument VLT-SPHERE et 1^{er} coronographe au Dôme C

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 6 juin 2008

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'université de Nice Sophia-Antipolis

Mention Sciences de l'Univers

par

Géraldine Guerri

Composition du jury :

<i>Président :</i>	Yves Rabbia	Observatoire de la Côte d'Azur
<i>Rapporteurs :</i>	Kjetil Dohlen Andreas Glindemann Laurent Koechlin	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille European Southern Observatory Observatoire Midi-Pyrénées
<i>Examineur :</i>	Jean Surdej	Département AGO - Université de Liège
<i>Directeurs de thèse :</i>	Farrokh Vakili Philippe Bendjoya	Laboratoire A.H. Fizeau Laboratoire A.H. Fizeau
<i>Invité :</i>	Gérard Greiss	Sud-Est Optique de Précision

Contribution à l'étude expérimentale et numérique de coronographes stellaires : instrument VLT-SPHERE et 1^{er} coronographe au Dôme C

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 6 juin 2008

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'université de Nice Sophia-Antipolis

Mention Sciences de l'Univers

par

Géraldine Guerri

Composition du jury :

<i>Président :</i>	Yves Rabbia	Observatoire de la Côte d'Azur
<i>Rapporteurs :</i>	Kjetil Dohlen Andreas Glindemann Laurent Koechlin	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille European Southern Observatory Observatoire Midi-Pyrénées
<i>Examineur :</i>	Jean Surdej	Département AGO - Université de Liège
<i>Directeurs de thèse :</i>	Farrokh Vakili Philippe Bendjoya	Laboratoire A.H. Fizeau Laboratoire A.H. Fizeau
<i>Invité :</i>	Gérard Greiss	Sud-Est Optique de Précision



Remerciements

Je voudrais remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de mener à terme et à bien cette expérience et cette tranche de vie si particulière qu'est la thèse. Et je m'excuse par avance pour celles que je pourrais malencontreusement oublier.

J'ai effectué cette thèse au sein du Laboratoire Fizeau (anciennement Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice, LUAN) grâce à une bourse de Docteur-Ingénieur financée par le CNRS et la région Provence Alpes Côte d'Azur.

Je voudrais tout d'abord remercier mes directeurs de thèse, Philippe Bendjoya et Farrokh Vakili pour leur patience, leurs conseils ainsi que leur foi en moi. Merci de m'avoir toujours donné les moyens ou les pistes pour m'en sortir et ce quelles que soient les circonstances.

Je remercie Yves Rabbia de l'Observatoire de la Côte d'Azur pour avoir si aimablement présidé mon jury de thèse. Je remercie également les rapporteurs, Kjetil Dohlen du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), Andreas Glindemann de l'European Southern Observatory (ESO, Garching bei München, Allemagne) et Laurent Koechlin de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Toulouse) ainsi que le professeur Jean Surdej de l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège (Département AGO, Liège, Belgique) pour avoir accepté de juger ce travail, ainsi que pour leur lecture consciencieuse et leurs commentaires avisés.

Je voudrais aussi adresser mes profonds remerciements à Gérard Greiss, PDG de l'entreprise Sud-Est Optique de Précision (Lorgues, France), pour avoir accepté d'être le partenaire industriel de ma thèse. En plus d'être le fabricant de l'un des composants clés que j'ai été amenée à tester, je le remercie vivement d'avoir mis à ma disposition du matériel de son entreprise lorsque j'en ai eu besoin et aussi pour nos échanges très chaleureux et sympathiques.

J'aimerais maintenant tout particulièrement remercier mes deux "parrains" scientifiques : Sylvie Robbe-Dubois du Laboratoire Fizeau et Jean-Pierre Rivet de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Merci infiniment pour votre disponibilité, votre écoute votre confiance et votre foi en moi quand moi même je n'y croyais plus. Grâce à vous j'ai appris la patience, la persévérance à toute épreuve qui finit par payer quels que soient le contexte ou les circonstances ainsi qu'une méthodologie de travail rigoureuse et ce, dans la joie et la bonne humeur.

Merci aux "SPHERistes" (Lyu Abe, Marcel Carbillet Jean-Baptiste Daban, Richard Douet, Carole Gouvret, Alex Robini) pour leur soutien, leurs conseils et les bons moments passés ensemble. Je tiens à remercier plus particulièrement Richard Douet pour les longues discussions sur l'optique et son aide non quantifiable pour les expériences en laboratoire et ce notamment lors des missions à l'observatoire de Paris-Meudon.

Je tiens aussi à remercier nos collègues du LESIA à l'Observatoire Paris-Meudon, Jacques Baudrand, Pierre Riaud et Anthony Boccaletti pour nous avoir permis d'effectuer nos tests dans l'infrarouge sur leur banc coronographique, leur soutien technique sur place ainsi que pour les échanges, constructifs ou plus poussifs que nous avons eu dans le cadre de notre collaboration

sur le projet SPHERE.

Je souhaite également faire part de toute ma gratitude à l'Université de Nice Sophia-Antipolis, l'école Doctorale SFA (Sciences Fondamentales et appliquées) et tout le collectif pédagogique du dernier DEA d'Astrophysique dirigé par Albert Bijoui et Marianne Faurobert.

Je voudrais aussi remercier chaleureusement les administratifs Valérie Chéron, Jocelyne Bettini, Cathy Blanc, Caroline Daire et Gérard Biancheri pour leur aide et leur conseil concernant les nombreuses démarches administratives qui jalonnent la vie d'un chercheur notamment les commandes de matériel, les préparatifs des missions et aussi pour tous ces petits rien organisationnels qui peuvent nous faciliter la vie quand nous sommes parfois trop déconnectés de la réalité ou égarés par nos recherches.

Merci également aux informaticiens Yan Fantei-Caujolle et Evelyne Augier pour leur support technique précieux pour dompter cet animal féroce qu'est l'informatique, surtout quand il fait sa tête de mule.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Henri Lanteri alias "Mr Déconvolution" du laboratoire et Olivier Chesneau de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Dommage que ce beau projet autour de l'étoile Eta Carinae n'ait pas abouti...en tout cas vos enseignements me seront précieux tout au long de ma carrière scientifique.

Merci tout particulier aux stagiaires que j'ai eu la chance de co-encadrer lors de ma thèse : Jonathan Gauvin, Marie-Adeline Berger, Julien Sarry, Sandrine Auroux, Guillemette Rous, Fabien Rivassou, Julie Brizi, Claire Caratti, Charline Filloux. Parfois j'ai du leur paraître un peu exigeante mais en tout cas il furent pour moi une occasion unique de pouvoir partager mes connaissances et mon expérience mais aussi d'apprendre à clarifier et synthétiser mon expression pour pouvoir les aider et les guider dans leur travail, puisque, comme le dit le proverbe " ce qui se conçoit bien s'énonce clairement ". Sans le savoir, ils furent aussi une certaine bouffée d'oxygène, lorsque, moi même, perdue dans mes recherches, je pouvais voir dans leur attitudes et/ou leur regard cette joie si communicative et régénératrice, soit d'avoir appris quelquechose, ou encore d'avoir mené à bien une étape de leur stage.

Enfin je voudrais remercier les membres de l'UMR Artemis (Catherine Nary Man, Frédéric Cleva, François Bondu, Linda Mondin, Alain Brillet, Marylène Fontana, Serge Bonhomme) que j'ai été amenée à cotoyer lors de l'été 2002 pour mon stage de deuxième année d'école d'ingénieur. Grâce à vous j'ai découvert et aimé l'instrumentation pour l'astrophysique.

Je voudrais maintenant remercier les doctorants et étudiants que j'ai été amenée à cotoyer : Alexis Carlotti, Isabelle Smith, Guillaume Petitjean, Wassila Dali-Ali, Pierre-Marie Gori, Amokrane Berdja, Florentin Millour, Lucie Rolland, Adrian Belu, Catherine Grec, Mélanie Venet, Sylvain Péron, Hélène Posbic. Merci notamment pour les repas joyeux et animés au restaurant universitaire, les soirées décalées-chic, les randonnées de la mort de la qui tueet aussi pour leur soutien précieux et leur aide à divers moments de ma vie en thèse.

Je souhaiterais achever ces remerciements en ayant une pensée toute particulière pour mes amis en remerciements des moments difficiles traversés ensemble, et des choses qui ne s'expriment plus avec des mots, mais avec le coeur : Emilie Biehler, Virginie Borkowski, Cécile Dimur, Cédric Jacob, Tatyana Sadibekova, Jessica Shama.

And, last but not least, je veux remercier particulièrement ma famille et particulièrement ma maman et ma mamie. Jamais je n'aurais pu réaliser cette recherche doctorale sans leur patience et leur énorme soutien moral pendant les moments difficiles pour moi. Même de loin, ils m'accordent toujours toute leur attention et leur amour qui ont été ma source et ma force. J'ai aussi une pensée toute particulière pour le seul scientifique de la famille, mon grand-père Delphin, qui, j'en suis sûre, même de là-haut, m'a guidée et portée pour que je mène à bien ces travaux de recherche.

Nice, Septembre 2008

*Petit à petit,
l'oiseau fait son nid...*

*"Mesure ce qui est mesurable,
et rends mesurable ce qui ne ne peut pas être mesuré"*

Galilée

*"Je rêvais d'un autre monde
Où la terre serait ronde
Où la lune serait blonde
Et la vie serait féconde
Je rêvais d'une autre terre
Qui resterait un mystère
Une terre moins terre à terre..."*

'Un autre monde', Téléphone

A ma mamie et ma maman, mes plus grandes fans

Table des matières

Table des figures	xix
Liste des tableaux	xxix
Acronymes et abréviations	1
Introduction	3
I La coronagraphie : Pourquoi ? Comment ?	7
1 Le défi de la détection d'exoplanètes	9
1.1 Présentation, défi et point sur le nombre de planètes détectées	9
1.2 Méthodes de détection indirectes	10
1.2.1 La méthode des vitesses radiales	10
1.2.2 La méthode des mesures astrométriques	12
1.2.3 La méthode de chronométrie par pulsars millisecondes	12
1.2.4 La méthode des transits planétaires	13
1.2.5 La méthode des microlentilles gravitationnelles	14
1.2.6 Interférométrie différentielle depuis le sol avec VLTI/AMBER	15
1.3 Présentation des projets de détection directe en cours autres que la coronagraphie	15
1.3.1 Interféromètres spatiaux DARWIN et TPF	15
1.3.2 Les interféromètres à frange noire au sol	16
1.4 Premiers enseignements d'une dizaine d'années de détection d'exoplanètes . .	16
1.5 Intérêt de la coronagraphie pour la détection d'exoplanètes	19
2 Principes de Coronagraphie	21
2.1 Coronagraphie de Lyot	21
2.1.1 Historique	21

2.1.2	Le coronographe de Lyot stellaire	22
2.2	La coronographie interférentielle	23
2.2.1	Le coronographe de Roddier & Roddier ou à masque de phase	23
2.2.2	Le coronographe à 4 quadrants	24
2.2.3	Le coronographe à couteau de phase achromatique (APKC)	25
2.2.4	L'Annular Groove Phase Mask (AGPM)	25
2.2.5	Le Coronographe Interférentiel Achromatique (CIA)	26
2.3	Coronographie à ouvertures apodisées ou coronographie d'amplitude	26
2.3.1	Apodisation par des fonctions prolates	27
2.3.2	Apodisation par reconfiguration de pupille : le Phase Induced Amplitude Apodization Coronagraph (PIAAC)	27
2.3.3	Autres configurations	27
2.4	Terminologie pour l'évaluation des performances coronographiques	28
2.5	Limitations principales et comparaison des différents coronographes	29
2.6	Principaux facteurs limitant la détection à fort contraste	30
2.7	Techniques complémentaires à la coronographie et post-traitements	30
2.7.1	Dark Speckle ou la méthode des tavelures noires	30
2.7.2	Dark Hole ou la méthode des trous sombres	31
2.7.3	Soustractions centro-symétriques	31
2.7.4	Imagerie différentielle simultanée	31
2.8	Apports en astrophysique de l'imagerie par optique adaptative et coronographie	32
2.9	Etat de l'art de l'ITHD par optique adaptative et coronographie	32
2.9.1	Projets au sol	32
2.9.2	Projets spatiaux	33

II Développement d'un coronographe de Lyot apodisé pour l'instrument VLT-SPHERE 35

1	L'instrument SPHERE	37
1.1	Présentation de l'instrument SPHERE	37
1.2	Objectifs astrophysiques de l'instrument SPHERE	37
1.3	Description du design de l'instrument SPHERE	38
1.3.1	Le "Common Path"	39
1.3.2	IRDIS, le spectrographe et l'imageur infrarouge à deux longueurs d'onde	40
1.3.3	IFS, le spectrographe infrarouge à champ intégral	41
1.3.4	ZIMPOL, l'imageur différentiel dans le visible	41
1.4	Spécifications de base de l'instrument SPHERE et modes d'observation	41

1.5	Contribution du LUAN au projet SPHERE	42
1.5.1	Contexte et chronologie générale	42
1.5.2	Contexte et chronologie concernant le développement du coronographe de Lyot apodisé	43
2	Présentation détaillée du coronographe de Lyot apodisé (ALC)	45
2.1	Introduction : les coronographes d'amplitude	45
2.1.1	Historique	45
2.1.2	Premières applications stellaires	45
2.2	Présentation de l'ALC optimisé pour l'instrument VLT-SPHERE	46
2.3	Formalisme dans le cas idéal d'une pupille d'entrée ronde	47
2.3.1	Expression des amplitudes complexes de l'onde lumineuse dans les dif- férents plans	47
2.3.2	Recherche de la fonction d'apodisation optimale	48
2.4	Etude théorique dans le cas réel du VLT	49
2.5	Optimisation des composants de l'ALC	50
2.6	Avantages et inconvénients de l'ALC	52
2.7	Etat de l'art des techniques de fabrication d'apodiseur	52
3	Simulation des propriétés de chromatisme des apodiseurs optiques	55
3.1	Introduction	55
3.2	Propriétés optiques de l'Inconel et du substrat	55
3.3	Présentation de la simulation du dépôt d'une couche mince	57
3.3.1	Expression analytique de la transmittivité et de la réflectivité de l'apo- diseur	58
3.3.2	Expression analytique du déphasage introduit par l'apodiseur	59
3.3.3	Etapas du programme de calcul	60
3.4	Résultats des simulations	60
3.4.1	Présentation des 2 profils en transmission à considérer	60
3.4.2	Transmittivité totale en fonction de l'épaisseur de métal déposée . . .	61
3.4.3	Epaisseur de dépôt requise pour fabriquer l'apodiseur	61
3.4.4	Réflectivité totale du système en fonction de l'épaisseur du métal déposé	64
3.4.5	Réflectivité de l'apodiseur	64
3.4.6	Déphasage en réflexion introduit par l'apodiseur	67
3.4.7	Déphasage en transmission introduit par l'apodiseur	67
3.5	Conclusion	67

4	Pré-phase B de SPHERE : caractérisation de l'ALC $3\lambda/D$ visible	71
4.1	Présentation du banc d'Imagerie à Très Haute Dynamique du laboratoire . . .	71
4.1.1	Description des composants du banc ITHD	72
4.1.2	Description des composants propres à l'ALC $3\lambda/D$	74
4.1.2.1	Le masque pupillaire	74
4.1.2.2	L'apodiseur	75
4.1.2.3	Le masque coronographique	77
4.1.2.4	Le diaphragme de Lyot	78
4.1.3	Processus d'alignement du banc ITHD	79
4.2	Etude expérimentale du coronographe de Lyot apodisé $3\lambda/D$ dans le visible .	80
4.2.1	Préambule : présentation des différentes étapes de la qualification du coronographe	80
4.2.2	Caractérisation de l'apodiseur en lumière quasi monochromatique autour de $\lambda = 600$ nm	81
4.2.3	Mesure des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ en lumière monochromatique à $\lambda = 632.8$ nm	83
4.2.3.1	Mesure des performances coronographiques d'un coronographe de Lyot $3\lambda/D$ classique (CLC)	83
4.2.3.2	Mesure des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$.	85
4.2.3.3	Comparaison des performances coronographiques Lyot classique - Lyot apodisé pour un masque coronographique à $3\lambda/D$.	86
4.2.4	Mesures de sensibilité au déplacement des composants de l'ALC $3\lambda/D$ en lumière monochromatique à $\lambda = 632.8$ nm	87
4.2.4.1	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral de l'apodiseur	87
4.2.4.2	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral du masque coronographique	88
4.2.4.3	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral du Lyot Stop	90
4.2.4.4	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ à la défocalisation de l'apodiseur	91
4.2.4.5	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ à la défocalisation du masque coronographique .	92
4.2.4.6	Mesure de sensibilité des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$ à la défocalisation du Lyot stop	94

4.2.4.7	Tolérances sur le positionnement des composants de l'ALC 3 λ /D visible	95
4.2.5	Mesure de la transmission de l'apodiseur en bande étroite dans le do- maine visible	96
4.2.6	Mesure de la réflexion de l'apodiseur en bande étroite dans le domaine visible	97
4.3	Conclusion concernant l'étude expérimentale du coronographe de Lyot apo- disé 3 λ /D dans le visible	98
5	Etude numérique du coronographe de Lyot apodisé pour l'instrument SPHERE/VLT	99
5.1	Introduction	99
5.2	Spécifications requises par SPHERE pour la coronographie	99
5.3	Calcul des profils des apodiseurs pour l'ALC IR de SPHERE	99
5.4	L'outil de simulation de l'instrument SPHERE/VLT : le Software Package CAOS-SPHERE	101
5.5	Optimisation de la taille du masque coronographique de l'ALC pour l'instru- ment SPHERE	109
5.5.1	Cas idéal	109
5.5.2	Cas réel en tenant compte des aberrations	109
5.5.3	Conclusion	110
5.6	Tolérancement du profil en transmission de l'apodiseur	110
5.7	Tolérancement du positionnement des composants de l'ALC	113
5.7.1	Etude du décentrage de l'apodiseur	113
5.7.2	Etude du décentrage du masque coronographique	114
5.7.3	Etude du décentrage du diaphragme de Lyot	115
5.7.4	Conclusion sur le décentrage des composants de l'ALC	115
5.8	Etude des "ghosts" introduits par l'apodiseur	116
5.8.1	Besoins de l'instrument SPHERE concernant les ghosts	116
5.8.2	Calcul de la pupille de ghost	116
5.8.3	Simulation de la PSF de ghost	117
5.9	Etude de l'influence de l'erreur de front d'onde introduite par l'apodiseur . .	119
5.10	Conclusion	120
6	Tests en laboratoire de l'ALC à 4λ/D dans l'infrarouge	121
6.1	Introduction	121
6.2	Description du banc de test	122

6.3	Caractéristiques des composants propres au coronographe	124
6.3.1	Le masque pupillaire	124
6.3.2	L'apodiseur	125
6.3.3	Le masque coronographique	127
6.3.4	Le Lyot stop	128
6.3.5	Le système imageur de pupille	129
6.4	Procédure d'alignement	130
6.5	Procédure d'acquisition et de traitement des données	131
6.5.1	Mesures du profil en transmission de l'apodiseur	131
6.5.2	Mesures des performances coronographiques de l'ALC	132
6.6	Mesures	132
6.6.1	Mesures du profil en transmission de l'apodiseur en bande Y, J, H . .	132
6.6.2	Mesures des performances coronographiques en bande Y, J et H . . .	138
6.6.2.1	Mesure en bande H	138
6.6.2.2	Mesure en bande J	140
6.6.2.3	Mesure en bande Y	142
6.6.2.4	Synthèse	144
6.6.3	Mesures de sensibilité du coronographe au déplacement latéral de ces composants en bande H	144
6.6.3.1	Sensibilité au déplacement latéral de l'apodiseur	144
6.6.3.2	Sensibilité au déplacement latéral du masque coronographique	145
6.6.3.3	Sensibilité au déplacement latéral du diaphragme de Lyot . .	147
6.6.4	Mesures de sensibilité du coronographe à la défocalisation de ces com- posants en bande H	148
6.6.4.1	Sensibilité au défocus de l'apodiseur	148
6.6.4.2	Sensibilité à la défocalisation du masque coronographique . .	148
6.6.4.3	Sensibilité à la défocalisation du Lyot stop	149
6.6.5	Conclusion sur la sensibilité de l'ALC $4\lambda/D$ aux déplacements latéraux et longitudinaux de ses composants : spécifications sur leur position- nement	150
6.6.6	Difficultés rencontrées	150
6.7	Conclusions et perspectives	151
6.7.1	Premières conclusions relatives à la caractérisation de l'ALC $4\lambda/D$ dans l'IR	151
6.7.2	Perspectives concernant la suite de la caractérisation	152

7	Conclusion et perspectives	153
7.1	Conclusion concernant les travaux effectués	153
7.2	Perspectives concernant le banc ITHD du LUAN	154
7.2.1	La 2 ^{ème} version du banc ITHD, le banc ITHD dynamique	154
7.2.1.1	Objectifs	154
7.2.1.2	Caractérisation du miroir déformable MIRAOTM 52	154
7.2.1.3	Conception et étude prévisionnelle du banc ITHD dynamique	156
7.2.2	Autres perspectives du laboratoire autour du banc ITHD	157
7.3	Perspectives concernant le développement de l'ALC infrarouge de SPHERE .	157
7.4	Conclusion générale sur l'instrument SPHERE/VLT :	158
III	CORONA : première expérience de coronagraphie stellaire à masque de phase au Dôme C en Antarctique	159
1	Contexte et motivations	161
1.1	Introduction	161
1.2	Rappels sur la station CONCORDIA du Dôme C	162
1.3	Principe du coronographe à couteaux de phase (APKC)	162
1.4	Motivations	163
2	L'instrument CORONA	165
2.1	Le masque de phase achromatique à couteaux de phase	166
2.2	Le banc coronographique	167
2.3	Le télescope	168
2.4	Antarctisation de l'instrument	169
2.4.1	Le télescope	169
2.4.2	Le masque coronographique	171
3	Tests en laboratoire de l'APKC	173
3.1	Tests effectués avec une pupille d'entrée ronde	173
3.2	Tests effectués avec une pupille à obstruction centrale	177
3.3	Tests effectués avec une pupille d'entrée à 4 trous	178
3.4	Conclusion	181
4	Premiers tests sur le ciel du coronographe stellaire CORONA au Dôme C	183
4.1	La campagne de décembre 2005	184
4.1.1	Conditions d'observations et contraintes	184

4.1.2	Journal des observations et étoiles observées	184
4.2	La réduction des données	185
4.2.1	Organisation des données et particularités	185
4.2.2	Le recentrage-fenêtrage des images	186
4.2.3	Photométrie sur les images non-coronographiées	189
4.2.4	Photométrie sur le résidu coronographié	191
4.2.5	Détermination du taux de réjection	192
4.3	Les résultats	193
4.3.1	Premières évaluations de réjection sur une étoile simple	193
4.3.2	Evaluations de réjection sur une étoile double	194
4.3.3	Synthèses des valeurs de réjection obtenues lors de la première cam- pagne d'été de CORONA	196
4.4	Discussion	198
4.5	Premier hiver infructueux de CORONA au Dôme C	198
5	Conclusions et perspectives	201
6	Article soumis à PASP	203
	Conclusion et perspectives de ce travail de thèse	217
	Annexes	221
A	Liste des publications	223
B	Article portant sur le travail expérimental de caractérisation du premier prototype d'ALC $3\lambda/D$ visible paru dans SPIE	225
C	Article portant sur les simulations numériques pour le projet VLT-SPHERE soumis à A&A	239
D	Article portant sur le travail expérimental pour le projet VLT-SPHERE soumis à A&A	247
	Bibliographie	259

Table des figures

1.1	Inventaire des exoplanètes déjà détectées d’après l’encyclopédie des planètes extrasolaires de Jean Schneider (http://exoplanet.eu).	10
1.2	Mesures de vitesses radiales en fonction de la phase orbitale pour 51 Peg (Mayor et Queloz, 1995 [75]), Période = 4,23 jours, Masse = 0,45 $M_{Jupiter}$, Distance = 0,05 AU.	11
1.3	Principe de la méthode de détection par transit planétaire primaire (© Hans Deeg).	13
1.4	Courbe de transit de Corot-Exo-1b, la première planète extrasolaire détectée par le satellite COROT le 3 mai 2007.	14
1.5	Courbe de lumière obtenue lors de la détection par lentille gravitationnelle d’OGLE-2005-BLG-390Lb (Beaulieu et al., 2006 [20]).	14
1.6	Images des 3 premières planètes extrasolaires imagées directement par l’instrument NAOS-CONICA du VLT : (a) 2M1207 b, (b) AB Pic b, (c) GQ Lupi b.	18
2.1	Schéma optique général d’un coronographe de Lyot.	21
2.2	Distribution d’intensité dans les différents plans focaux et pupillaires : le plan P1 correspond au plan pupillaire d’entrée ; le plan P2 est le plan focal où se trouve le masque occultant ; le plan P3 est le second plan pupille où l’on place le diaphragme de Lyot et le plan P4 est le second plan focal (figure issue de Guyon et al., 1999 [54]).	22
2.3	Principe du Coronographe à masque de phase et distribution d’intensité au niveau des différents plans (Thèse O. Guyon, 2002).	24
2.4	Schéma optique du coronographe à quatre quadrants et distribution d’intensité associées dans le cas où un compagnon de 15 magnitudes plus faible (rapport de flux de 10^6) est situé à $2.1 \lambda/D$ de l’étoile (Rouan et al., 2000 [90]).	25
2.5	Principe de fonctionnement du CIA (http://www.oca.eu/baudoz/coro/coro.html).	26
2.6	Illustration des différents critères d’évaluation des performances coronographiques.	28
1.1	Les 4 télescopes de 8m du VLTI au Mont Paranal au Chili (http://www.eso.org/gallery).	37
1.2	Concept global de l’instrument SPHERE montrant les quatre sous-systèmes de l’instrument : Common Path, IRDIS, IFS et ZIMPOL [21]. Les faisceaux optiques sont représentés en rouge pour le proche infrarouge, bleu pour le visible et orange pour le common path.	39
1.3	Implémentation de l’instrument SPHERE sur la plateforme d’un VLT [21].	39
1.4	Design optique de l’instrument SPHERE [21].	40

2.1	Principe du coronographe de Lyot apodisé avec représentation de ces composants principaux (flèches orange/rouge) et des images dans les différents plans (flèches noires) dans le cas de l'ALC optimisé pour l'instrument VLT-SPHERE : (a) pupille d'entrée du VLT, (b) apodiseur, (c) PSF au foyer du télescope, (d) PSF quand le masque coronographique est présent, (e) image de la pupille avant l'introduction du Lyot stop, (f) diaphragme de Lyot, (g) image de la pupille avec le diaphragme de Lyot, (h) PSF coronographiée finale.	46
2.2	Schéma de principe du coronographe de Lyot apodisé montrant les différentes notations utilisées dans le formalisme.	47
2.3	Transmission de l'apodiseur en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique pour différents taux d'obstruction centrale (Martinez et al., 2007 [74]).	49
2.4	Principe de l'algorithme de minimisation de la fonction d'apodisation.	50
2.5	Exemple de forme d'apodiseur obtenue pour la géométrie de la pupille du VLT et pour un masque coronographique de diamètre angulaire $4\lambda/D$. La valeur minimale de la transmission radiale est 11.52% au niveau des bords et la valeur de la transmission globale de l'apodiseur est élevée et vaut 60.71%.	51
3.1	Evolution des coefficients de réfraction (bleu) et d'extinction(vert) de l'Inconel 600 en fonction de la longueur d'onde.	56
3.2	Evolution des indices de réfraction en fonction de la longueur d'onde des susstrats utilisés lors de la fabrication des apodiseurs : (a) BK7 et (b) CaF_2 du visible au proche infrarouge.	57
3.3	Schéma des différents interfaces considérés pour la simulation.	57
3.4	Etapes du programme de calcul des propriétés optiques de l'apodiseur.	60
3.5	Profils en transmission des 2 apodiseurs à considérer : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible, (b) apodiseur $4\lambda/D$ infrarouge.	61
3.6	Transmittivité totale du système en fonction de l'épaisseur d'Inconel déposé dépendant de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	62
3.7	Epaisseur d'Inconel 600 à déposer radialement en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	63
3.8	Réflectivité de l'Inconel 600 en fonction de l'épaisseur déposée et de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	65
3.9	Réflectivité radiale de l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	66
3.10	Déphasage radial en réflexion introduit par l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	68
3.11	Déphasage radial en transmission introduit par l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.	69
4.1	Photo du banc d'Imagerie à Très Haute Dynamique du LUAN.	71
4.2	Schéma descriptif du banc ITHD du LUAN.	72
4.3	Forme et taille du masque pupillaire d'entrée reproduisant la pupille du VLT. . .	74

4.4	Transmission théorique de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible envoyée au fournisseur : (gauche) vue 2D, (droite) profil radial optimal en transmission.	75
4.5	Mesure de la transmission de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible effectuée par le fabricant Reynard Corp : (gauche) document fourni, (droite) interprétation.	76
4.6	Profil radial moyen de la transmission de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible obtenu à partir de la mesure effectuée par le fabricant Reynard Corp (courbe rouge) ; pour comparaison sont tracés en noir le profil théorique et en bleu le profil théorique $\pm 5\%$	77
4.7	Forme et taille du masque coronographique à $3\lambda/D$	77
4.8	Dimensions et angles pour la fabrication du Lyot stop.	78
4.9	Etapes du réglage de la position du diaphragme de Lyot : (gauche) diaphragme de Lyot non focalisé ni centré, (centre), diaphragme de Lyot uniquement focalisé, (droite) diaphragme de Lyot focalisé et centré.	79
4.10	Etapes du réglage du centrage du masque coronographique : (gauche) masque non focalisé ni centré, (centre), masque uniquement focalisé, (droite) masque focalisé et centré.	80
4.11	Schéma de principe de la mesure de transmission de l'apodiseur.	81
4.12	(a) Image de la pupille de référence, (b) image de la pupille apodisée, (c) coupe de transmission de l'apodiseur : (noir) coupe moyenne obtenue à partir de 360 coupes de la pupille apodisée mesurée, (bleu) coupe fournie par le fabricant. . .	82
4.13	Vue 2D (a) et 3D (b) de la pupille apodisée divisée, (c) profil radial moyen de transmission de l'apodiseur : (bleu) profil mesuré, (rose) profil mesuré par le constructeur, (rouge) profil théorique, (noir) limites de tolérance.	82
4.14	Coronographe de Lyot classique à $3\lambda/D$: (a) image de référence, (b) image coronographiée, (c) profils radiaux moyens correspondants (référence en bleu et corono en rose) auxquels se superposent les profils simulés en pointillés.	84
4.15	Coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$: (a) image de référence apodisée, (b) image coronographiée, (c) profils radiaux moyens correspondants (référence en vert et coronographié en rouge) auxquels se superposent les profils simulés en pointillés. .	85
4.16	Comparaison CLC-ALC : profils radiaux moyens des PSF mesurées (bleu) de référence non apodisée, (vert) de référence apodisée, (rose) coronographiée non apodisée, (rouge) coronographiée apodisée.	86
4.17	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral de l'apodiseur : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	87
4.18	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral de l'apodiseur : évolution (noir) de l'extinction et (bleu) de la réjection en fonction de la valeur du déplacement. . . .	88
4.19	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du masque coronographique : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	89
4.20	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du masque coronographique : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.	89
4.21	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du Lyot stop : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	90
4.22	Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du Lyot stop : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.	91

4.23	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation de l'apodiseur : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	91
4.24	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation de l'apodiseur : évolution (noir) de l'extinction et (bleu) de la réjection en fonction de la valeur du déplacement.	92
4.25	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation du masque coronographique : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	93
4.26	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation du masque coronographique : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.	93
4.27	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation du Lyot stop : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.	94
4.28	Sensibilité de l'ALC à la défocalisation du Lyot stop : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.	95
4.29	Mesure du coefficient de transmission de l'apodiseur (noir) comparée à la simulation numérique (bleu).	96
4.30	Schéma de principe de la mesure de réflectivité de l'apodiseur.	97
4.31	Mesure du coefficient de réflexion de l'apodiseur (noir) et comparaison avec la simulation numérique (bleu).	97
5.1	Profils en transmission d'apodiseurs calculés pour différents diamètres angulaires de masques coronographiques allant de $3\lambda/D$ à $5\lambda/D$ par pas de $0.1\lambda/D$. L'apodiseur calculé pour le masque $4\lambda/D$ est mis en évidence par les croix.	100
5.2	Un exemple d'utilisation de CAOS : simulation d'une optique adaptative.	101
5.3	Interface graphique de simulation sous CAOS de l'instrument SPHERE, exemple de simulation du module IRDIS.	102
5.4	Structure générale du modèle de simulation de l'imageur différentiel IRDIS de l'instrument SPHERE/VLT.	103
5.5	Interface graphique du module AOC du simulateur CAOS-SPHERE ; les paramètres entre parenthèses ne peuvent être modifiés.	103
5.6	Interface graphique du module COP du simulateur CAOS-SPHERE.	105
5.7	Interface graphique du module IRD du simulateur CAOS-SPHERE.	106
5.8	Exemple de PSF obtenues après la réduction de données.	108
5.9	Optimisation de la taille du masque coronographique dans le cas idéal : évolution des contrastes de l'ALC à 0.5", 1.5" et 2" en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique.	109
5.10	Optimisation de la taille du masque coronographique en tenant compte des aberrations : évolution des contrastes de l'ALC à 0.2", 0.5", 1" et 2" en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique pour (a) le cas brut, (b) en tenant compte de l'allure de la PSF.	110
5.11	Vue 1D des différents défauts introduits sur le profil en transmission de l'apodiseur par rapport à l'apodiseur idéal (représenté en rouge) : (a) présence d'une bosse assimilée à un pic localisé, (b) plateau dans la région où la transmission est maximale, (c) profil idéal entaché de rugosités sinusoïdales, (d) erreur de dépôt qui sous-estime ou sur-estime le gabarit idéal fourni.	111

5.12	Profils radiaux des PSF post-coronographe avec (a) l'apodiseur idéal et deux apodiseurs présentant des erreurs de transmission relatives moyennes de (b) 10% et (c) 25%.	111
5.13	Evolution des contrastes normalisés à 0.5" (b) pour différents types d'apodiseurs avec défaut (a) : theo = apodiseur théorique, plat = apodiseur avec plateau, rug = apodiseur avec des rugosités, bo_b = apodiseur avec une bosse au bord, bo_m = apodiseur avec une bosse au milieu, ga_1 = apodiseur avec un gabarit extérieur de 10% , ga_2 = apodiseur avec un gabarit intérieur de 10%.	112
5.14	Définition de l'angle α spécifiant la régularité du profil en transmission de l'apodiseur : (rouge) profil réel, (noir) profil théorique idéal souhaité, (vert) limite de tolérance relative inférieure, (bleu) limite de tolérance relative supérieure. α correspond à l'écart de pente entre le profil réel et le profil idéal.	113
5.15	Influence du décentrage de l'apodiseur : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.	114
5.16	Influence du décentrage du masque coronographique : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.	114
5.17	Influence du décentrage du Lyot stop : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.	115
5.18	Schéma de principe du ghost étudié : réflexion sur la face arrière de l'apodiseur puis sur l'interface substrat-Inconel. Les flèches bleues indiquent le sens de propagation du faisceau.	117
5.19	Intensité dans la pupille de ghost : (a) vue 2D, (b) profil radial moyen.	117
5.20	Profils radiaux moyens des PSF de ghost pour différentes valeurs de décentrage du ghost avec résidus atmosphériques et aberrations statiques et pour $R_t = 0.5\%$	118
5.21	Profils radiaux moyens des PSF DD et SD de ghost pour différentes valeurs de décentrage du ghost avec résidus atmosphériques et aberrations statiques et pour $R_t = 0.5\%$	118
5.22	Profils de PSF post-coronographe en tenant compte du déphasage introduit par l'apodiseur et pour différents diaphragmes de Lyot.	119
6.1	Schéma optique du banc infrarouge du LESIA (Boccaletti et al. [26]).	122
6.2	Implémentation mécanique du banc infrarouge du LESIA [26] : (a) vue 3D sous CATIA ; (b) photo du banc.	123
6.3	Photo du masque pupillaire reproduisant la pupille du VLT.	125
6.4	Photo de l'apodiseur.	125
6.5	Spécifications sur le profil en transmission de l'apodiseur : profil en transmission souhaité (noir) et limites de tolérances inférieure (bleu) et supérieure (rouge).	126
6.6	Mesures de la transmission de l'apodiseur effectuées par le fournisseur Reynard Corporation pour différentes longueurs d'onde : (vert) 0.95 μm , (cyan) 1.2 μm , (bleu) 1.6 μm , (magenta) 2.54 μm	126
6.7	Masque coronographique : (a) photo et (b) dessin technique montrant les neufs pastilles de Lyot et les motifs rectangulaires et triangulaires d'aide à l'alignement qui ont été déposés.	127
6.8	Photo (a) et schéma mécanique du Lyot stop (b).	129
6.9	Principe du test de Foucault : si le couteau est bien positionné au foyer, son ombre illumine la pupille uniformément (cas c) ; dans le cas contraire (cas a et b), l'ombre se trouve d'un coté de la pupille.	130
6.10	Etapes du programme de traitement des mesures de la transmission de l'apodiseur.	131

6.11	Etapes du programme de traitement des mesures des performances coronographiques de l'ALC.	132
6.12	Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande H (temps d'intégration = 2ms, 1 pixel = 100 μm).	133
6.13	Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande H, comparaison avec la mesure effectuée par le fabricant.	133
6.14	Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande J.	134
6.15	Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande J, comparaison avec la mesure effectuée par le fabricant.	134
6.16	Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande Y.	135
6.17	Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande Y, comparaison avec la mesure effectuée par le fabricant.	135
6.18	Profils radiaux moyens de la transmission de l'apodiseur en bande Y,J et H.	136
6.19	Comparaison des performances de l'ALC sur l'instrument SPHERE avec l'apodiseur théorique et l'apodiseur fabriqué avec résidus atmosphériques et aberrations statiques. SD= Simple Difference, DD=Double Difference.	137
6.20	(a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) Profils radiaux moyens des PSF en bande H : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillés correspondent aux données simulées numériquement.	138
6.21	Simulation des PSF obtenues avec l'ALC $4\lambda/D$ en bande J :(a) image de la PSF de référence non apodisée, (b) image de la PSF de référence apodisée, (c) image de la PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens de ces PSF.	140
6.22	(a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens des PSF en bande J : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillés correspondent aux données simulées numériquement.	141
6.23	Simulation des PSF obtenues avec l'ALC $4\lambda/D$ en bande Y :(a) image de la PSF de référence non apodisée, (b) image de la PSF de référence apodisée, (c) image de la PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens de ces PSF.	142
6.24	(a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens des PSF en bande Y : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillées correspondent aux données simulées numériquement.	143
6.25	Effet du déplacement latéral de l'apodiseur le long de l'axe X : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔX de l'apodiseur, de 0 à 1.5 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	144
6.26	Effet du déplacement latéral du masque coronographique le long de l'axe Y : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔY du masque coronographique, de 0 à 50 μm par pas de 10 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	145
6.27	Détermination de l'angle minimal de détection : profil de la PSF de référence apodisée et des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔY du masque coronographique.	146

6.28	Détermination de l'angle minimal de détection : évolution de la transmission de l'étoile par rapport au cas hors-axe (non coronographié) en fonction de la valeur du déplacement.	147
6.29	Effet du déplacement latéral du Lyot stop le long de l'axe X : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔX du Lyot stop, de 0 à 150 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	147
6.30	Effet du déplacement latéral du Lyot stop le long de l'axe Y : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔY du Lyot stop, de 0 à 200 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	148
6.31	Effet de la défocalisation de l'apodiseur : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔZ de l'apodiseur, de 0 à 5 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	149
6.32	Effet de la défocalisation du masque coronographique de Lyot : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔZ du masque coronographique, de -1 à 3 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	149
6.33	Effet de la défocalisation du Lyot stop : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔZ du masque coronographique, de -10 à 6 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.	150
6.34	Profils radiaux moyens des PSF de référence apodisées et non apodisées en bande Y. Traits pleins : mesures. Pointillés : simulations numériques.	152
7.1	Le miroir déformable MIRAOTM 52 : (a) photo, (b) schéma de principe.	154
7.2	Schéma de principe du montage optique de caractérisation du miroir déformable.	155
7.3	Premiers résultats de la caractérisation du miroir déformable, génération des premiers polynômes de Zernike : (haut) diagramme des tensions appliquées aux acteurs du miroir déformable, (bas) front d'ondes résultants obtenus par l'analyseur de surface d'onde.	156
7.4	Schéma de principe du montage optique du banc ITHD dynamique.	156
7.5	Exemple de masque réalisé pour fabriquer un apodiseur.	157
1.1	La station Concordia sur le plateau du Dôme C en Antarctique.	161
1.2	Principe du coronographe à couteaux de phase.	162
2.1	Vue 3D sous CATIA de l'instrument CORONA.	165
2.2	Assemblage optique du masque coronographique de l'APKC : deux couteaux de phase de 99 μm d'épaisseur sont accolés entre deux épaisses lames de verre de 6 mm.	166
2.3	Masque coronographique exposé aux conditions extrêmes du Dôme C en Novembre 2004.	166
2.4	Principe de l'instrument CORONA (pour la description des éléments voir la table 2.1).	167
2.5	Géométrie de la pupille d'entrée de CORONA : 4 trous entourent l'obstruction centrale ; les dimensions sont en mm.	169

2.6	Collage des miroirs sur leurs supports : moules fabriqués pour le collage (a) du miroir primaire et (b) du miroir secondaire; (c) miroir secondaire collé sur son support.	170
2.7	Antarctisation du télescope de CORONA : (a) dépôt d'un scotch sur la tranche des miroirs, (b) pièce antiflopping, (c) modification du support du miroir secondaire.170	
2.8	Processus de fabrication du masque coronographique de l'APKC : adhérence des paires de lames sur leurs support respectifs puis collage.	171
3.1	Schéma de principe de la mesure de validation du déphasage du masque APKC effectuée sur le banc ITHD du LUAN.	173
3.2	Schéma de principe de la mesure des performances coronographiques de l'APKC effectuée sur le banc ITHD du LUAN.	174
3.3	Images en plan pupille : (a) simulations numériques lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (gauche) puis à l'intersection des deux couteaux de phase. Mesures pour un rapport d'ouverture de (b) 205, (c) 156, (d) 118, (e) 106, (f) 94 et (g) 69 : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).175	
3.4	Images de référence et coronographiées et profils radiaux moyens correspondants. .	176
3.5	Images en plan pupille : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).	177
3.6	Images de référence et coronographiées et profils radiaux moyens correspondants. .	178
3.7	Images en plan pupille : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).	179
3.8	Simulation numérique des PSF de l'instrument CORONA attendues avec une pupille d'entrée à 4 trous : (a) PSF de référence, (b) PSF coronographiée.	179
3.9	Images de référence et coronographiées et profil radiaux moyens correspondants. .	180
4.1	5 décembre 2005, 11h heure locale : première lumière de CORONA au Dôme C. .	183
4.2	Exemple de poses courtes de l'étoile α Crux prises par l'instrument CORONA ($t_i = 10ms$) : images (a) de référence, (b) coronographiée et (c) de fond de ciel. .	186
4.3	Principales étapes de la procédure de réduction des données de CORONA.	187
4.4	Exemple de profil 1D obtenu en sommant les lignes ou les colonnes d'une image. .	187
4.5	Illustration de l'algorithme de recentrage des images : la détermination des coordonnées du centre de la croix est possible après le filtrage des profils 1D.	188
4.6	Etapes du programme de photométrie sur les images non-coronographiées.	190
4.7	Illustration de l'algorithme de calcul du niveau photométrique moyen du bruit de fond résiduel : positionnement des trois carrés à partir desquels le calcul est effectué.190	
4.8	Illustration de l'algorithme de sélection des pixels : visualisation des pixels sélectionnés.	191
4.9	Meilleure pose courte coronographiée de Canopus (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).	193
4.10	Meilleure pose courte coronographiée d' α Centaurii (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).	194
4.11	Meilleure pose courte coronographiée d' α Crux (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).	195

4.12 Poses longues (gauche) de référence et (droite) coronographiées des étoiles Canopus, α Cen et α Crux.	197
4.13 PSF de CORONA durant l'hiver 2006 au Dôme C.	199

Liste des tableaux

1.1	Propriétés des premières exoplanètes détectées par imagerie directe.	17
2.1	Comparaison qualitative des coronographes existants : 0, -, - -, - - - et - - - - correspondent respectivement à non, peu, moyennement, beaucoup et très sensible à.	30
1.1	Laboratoires membres du consortium SPHERE.	38
1.2	Spécifications de base de l'instrument SPHERE.	42
3.1	Composition chimique de l'alliage d'Inconel 600.	56
3.2	Valeurs des constantes de l'équation 3.1 pour le BK7 et le CaF_2	57
3.3	Paramètres d'entrée de la simulation pour les deux apodiseurs.	61
4.1	Descriptif des composants du banc ITHD du LUAN.	72
4.2	Spécifications techniques de la caméra CCD de science ADIMEC-1000M.	73
4.3	Inventaire des densités neutres présentes sur la roue à densités.	73
4.4	Spécifications du masque pupillaire.	74
4.5	Spécifications de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible.	75
4.6	Spécifications du masque coronographique $3\lambda/D$	78
4.7	Spécifications du diaphragme de Lyot.	79
4.8	Inventaire des performances coronographiques du coronographe de Lyot classique à $3\lambda/D$ et comparaison avec les valeurs théoriques.	84
4.9	Inventaire des performances coronographiques du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ et comparaison avec les valeurs théoriques.	86
4.10	Apport sur les performances coronographiques du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ par rapport au coronographe de Lyot classique et comparaison avec les valeurs théoriques.	87
4.11	Paramètres d'acquisition des différents déplacements du masque coronographique effectués : valeur du déplacement par rapport à la position nominale, valeur de la densité neutre placée derrière la source, temps d'intégration.	88
4.12	Inventaire des tolérances en position des composants du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$	95
4.13	Inventaire des filtres spectraux utilisés.	96
5.1	Spécifications requises pour la coronographie par l'instrument SPHERE.	100
5.2	Format des paramètres d'entrée du module AOC de CAOS-SPHERE.	104
5.3	Format des paramètres d'entrée du module COP de CAOS-SPHERE.	105
5.4	Longueurs d'onde minimale et maximale pour chaque filtre DBI.	106

5.5	Format des paramètres d'entrée du module IRD de CAOS-SPHERE.	107
5.6	Tolérances a priori sur le positionnement latéral des composants de l'ALC issues du SPHERE Coronagraph Design Report (Boccaletti et al., 2007 [27]).	113
5.7	Tolérances sur le positionnement latéral des composants de l'ALC déduites des simulations comparées à celles définies a priori dans le SPHERE Coronagraph Design Report (Boccaletti et al., 2007 [27]).	115
6.1	Descriptif du travail effectué lors des missions de test de l'ALC sur le banc infrarouge du LESIA.	121
6.2	Caractéristiques des filtres spectraux utilisés.	123
6.3	Caractéristiques principales du détecteur Raytheon du banc infrarouge du LESIA [48].	124
6.4	Spécifications techniques du masque pupillaire.	124
6.5	Caractéristiques de fabrication de l'apodiseur.	126
6.6	Inventaire et caractéristiques des pastilles présentes sur le composant masque de Lyot.	127
6.7	Spécifications de fabrication du masque coronographique de Lyot.	128
6.8	Spécifications techniques du Lyot stop.	128
6.9	Extinction et réjection de l'ALC en bande H obtenues expérimentalement et par simulation.	139
6.10	Extinction et réjection de l'ALC en bande J obtenues expérimentalement et par simulation.	141
6.11	Extinction et réjection de l'ALC en bande Y obtenues expérimentalement et par simulation.	143
6.12	Vue d'ensemble des performances de l'ALC.	144
6.13	Synthèse des valeurs des tolérances sur le positionnement des composants de l'ALC $4\lambda/D$ mesurées.	150
7.1	Spécifications du miroir déformable MIRAOTM 52.	155
2.1	Descriptif des composants de l'instrument CORONA.	167
2.2	Spécifications techniques de la caméra CCD de science PCO Pixelfly.	168
4.1	Journal des observations avec CORONA lors de la campagne de décembre 2005. .	184
4.2	Propriétés des étoiles observées avec CORONA lors de la campagne de décembre 2005.	185
4.3	Inventaire des séries de données obtenues avec CORONA en décembre 2005. N_{sky} , N_{ref} et N_{coro} correspondent respectivement aux nombres de séries d'images de fond de ciel, de référence et coronographiée qui ont été enregistrées.	185
4.4	Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile simple Canopus pour les journées des 05, 09, 11 et 13 décembre 2005. . . .	193
4.5	Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile double α Centaurii pour les journées des 08, 09 et 11 décembre 2005. . . .	194
4.6	Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile double α Crux pour la journée du 12 décembre 2005.	194
4.7	Statistique des meilleurs snapshots en considérant les performances coronographiques. s est le seeing médian (obtenu à partir de mesures du DIMM), n est le nombre total d'images, $n_{>10}$ est le nombre total d'images de réjection supérieure à 10, et ainsi de suite.	196

Acronymes et abréviations

CFHT	Canada-France-Hawaii Telescope
CIA	Coronographe Interférentiel Achromatique
HRA	Haute Résolution Angulaire
IPEV	Institut Paul-Emile Victor
ITHD	Imagerie à Très Haute Dynamique
LAM	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
LAOG	Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble
LESIA	Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
LUAN	Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice
OA	Optique Adaptative
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur

ADU	Analog Digital Unit
AGPM	Annular Groove Phase Mask
ALC	Apodized Lyot Coronagraph
AMBER	Astronomical Multiple BEam Recombiner
APKC	Achromatic Phase Knife Coronagraph
BBI	Broad Band Imaging
CAOS	Code for Adaptive Optics System
CCD	Charge-Coupled Device
CLC	Classical Lyot Coronagraph
CMOS	Complementary Metal Oxide Silicon
CORONA	CORONagraph Antarctic
DBI	Dual Band Imaging
DIMM	Differential Motion Monitor
ELT	Extremely Large Telescope
E-ELT	European Extremely Large Telescope
EPICS	Exo-Planets Imaging Camera and Spectrograph
ESA	European Space Agency
ESO	European Southern Observatory
FFT	Fast Fourier Transform
FOV	Field of view
FWHM	Full Width at Half Maximum
GPI	Gemini Planet Imager

HARPS	High-Accuracy Radial-velocity Planetary Search
HiCIAO	High-Contrast Coronagraph Imager for Adaptive Optics
HW-4QPM	Half Wave - Four Quadrant Phase Mask
HWHM	Half Width at Half Maximum
IFS	Integral Field Spectrograph
IRAN	Interferometric Remapped Array Nulling
IRDIS	Infra-Red Dual-beam Imaging and Spectroscopy
IWA	Inner Working Angle
JWST	James Webb Space Telescope
KEOPS	Kiloparsec Explorer for Optical Planet Search
MIRI	Mid-InfraRed Instrument
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PIAAC	Phase-Induced Amplitude Apodization Coronagraph
PNRA	Programma Nazionale di Ricerche in Antartide
PSF	Point Spread Function
PTV	Peak To Valley
RMS	Root Mean Square
SAXO	SPHERE Adaptive optics for eXoplanet Observation
SEE-COAST	Super-Earth Explorer - Coronagraph Off-Axis Space Telescope
SPHERE	Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch
SPICA	SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics
TPF	Terrestrial Planet Finder
UT	Unit Telescope
VLT	Very Large Telescope
VLTI	Very Large Telescope Interferometer
ZIMPOL	Zurich IMaging POLarimeter

Introduction

Depuis les temps les plus anciens et Epicure en 300 av. JC, se posent les questions de l'existence "d'autres mondes" et de la possibilité de vie ailleurs que sur notre planète Terre. Et ce n'est que 23 siècles plus tard, avec la découverte en 1995 par Mayor et Queloz [75] de la première exoplanète et l'amélioration de la sensibilité des instruments, que cette question devient un véritable champ de recherche accessible à la science moderne.

Depuis cette découverte de la première planète extrasolaire, la détection directe et la caractérisation spectrale d'une exoplanète sont devenues l'un des domaines astronomiques les plus passionnants et ambitieux.

Cependant, le fort contraste existant entre l'étoile et la planète, 10^9 dans le visible et 10^6 dans l'IR thermique dans le cas d'une exoTerre ou d'une exoJupiter ainsi que la faible séparation angulaire entre les deux objets requièrent des techniques et des instruments à la pointe de la technologie qui sont en cours de validation.

Une des grandes problématiques actuelles est d'être capable de développer une instrumentation, adaptée à l'imagerie à très haute dynamique et en particulier à la détection d'exoplanètes, et devant permettre de réduire de manière drastique le flux de l'étoile pour faciliter l'observation de la planète. Une des techniques prometteuses pour passer outre cette limitation est l'imagerie à très haute dynamique par optique adaptative et coronagraphie, thématique dans laquelle s'inscrivent mes travaux de thèse.

La première partie de mon manuscrit traite de la coronagraphie stellaire. Tout d'abord, je présente une vue d'ensemble des connaissances actuelles concernant l'un des buts ultimes de la coronagraphie stellaire, la détection et l'imagerie d'exoplanètes. Ensuite, je passe en revue l'éventail des connaissances actuelles relatives à la coronagraphie.

Dans la seconde partie, je présente les différentes études relatives au développement d'un coronographe de Lyot apodisé pour l'instrument VLT-SPHERE, instrument de seconde génération du VLT dédié à l'imagerie d'exoJupiters et dont la première lumière est prévue pour 2010.

Le chapitre 1 présente brièvement l'instrument et ses objectifs astrophysiques.

Dans le chapitre 2, je présente en détail tous les aspects du coronographe de Lyot apodisé.

Ensuite, je m'intéresse au chapitre 3 au composant novateur et important du coronographe de Lyot apodisé à savoir l'apodiseur et plus particulièrement à ses propriétés optiques : j'étudie par simulation numérique le chromatisme des propriétés optiques d'un apodiseur fabriqué par dépôt métallique d'un alliage d'Inconel sur un substrat de verre, méthode selon laquelle ont été fabriqués les deux apodiseurs que j'ai été amenée à tester par la suite en laboratoire.

J'ai ensuite caractérisé en laboratoire un premier prototype de coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ sur le banc d'imagerie visible à très haute dynamique du laboratoire (chapitre 4) pour valider expérimentalement le concept et les procédés de fabrication retenus.

Puis le chapitre 5 recense les études numériques qui ont été menées en début de phase B du projet SPHERE/VLT afin de dimensionner le prototype de l'ALC infrarouge susceptible d'être installé sur l'instrument.

Les tests en laboratoire de ce nouveau prototype d'ALC à $4\lambda/D$ dans l'infrarouge ont été réalisés sur le banc coronagraphique infrarouge du LESIA à l'Observatoire de Paris-Meudon et sont décrits dans le chapitre 6.

Enfin, la troisième partie de ce manuscrit nous envoie dans un autre endroit particulier sur Terre sur un continent où les conditions atmosphériques sont quasi-spatiales : la station Concordia sur le plateau du Dôme C en Antarctique. C'est ici qu'a été implanté en décembre 2005, CORONA, le premier coronographe stellaire antarctique. Après une description de l'instrument et de ses motivations (chapitres 1 et 2), je présente les tests en laboratoire du coronographe (chapitre 3) puis les résultats de la première lumière de l'instrument lors de la campagne d'été 2005 au Dôme C (chapitre 4).

Première partie

La coronographie : Pourquoi ? Comment ?

Chapitre 1

Le défi de la détection d'exoplanètes

1.1 Présentation, défi et point sur le nombre de planètes détectées

En 1995, les suisses Michel Mayor et Didier Queloz identifient la présence d'un corps gravitant autour de l'étoile 51Peg [75] : la première exo-planète dans le domaine visible est découverte.

C'est à partir de ce moment que la course aux exo-planètes a été lancée et que plusieurs solutions pour la détection de planètes extra-solaires ont vu le jour ces dix dernières années.

Malheureusement elles restent, pour la plupart, encore inexploitées et sont en cours de passage du cadre purement théorique à la réalisation pratique. Cependant, un effort considérable est investi dans la mise au point de ces techniques notamment pour les futures missions spatiales (Corot, Kepler, JWST).

La plupart sont des techniques dites "indirectes" puisqu'elles fournissent seulement une information sur la présence d'un corps supposé être une exo-planète. Même s'il est peu probable que ces objets soient autre chose que des planètes, leur nature exacte (taille, composition chimique) reste encore indéterminée pour la grande majorité d'entre elles.

Les méthodes d'observation directe quant à elles, consistent bel et bien à discriminer les photons émis ou réfléchis par la planète, mais elles n'ont encore jamais été mises en oeuvre jusqu'à présent. En effet, elles requièrent un ensemble de savoir-faire technologiques qui n'ont pas encore été totalement validés, ou du moins pas pour les spécifications souhaitées pour atteindre les contrastes de 10^6 à 10^9 (cas des exo-Jupiters ou exo-Terres dans l'infrarouge thermique ou dans le visible). Cette recherche d'exoplanètes est essentielle dans l'obtention de réponses à des questions que l'humanité se pose depuis bien longtemps, comme par exemple : Comment se forment les systèmes planétaires et avec quelle diversité ? Est-ce que notre système solaire est unique dans l'univers ? Existe-t-il de la vie et des civilisations ailleurs que sur Terre et ce autour d'autres étoiles ?

A l'heure d'aujourd'hui, plus de 300 planètes extrasolaires ont été détectées (voir fig 1.1) et ce principalement par la méthode de mesure de vitesse radiale et autour d'étoiles dont le type spectral va de M4 à F7 (Burrows [31]). Ces systèmes planétaires sont étonnants. Tout d'abord, les planètes sont très massives (de la masse de Jupiter ou plus) et pourtant elles sont de 10 à 100 fois plus près de leur étoile que Jupiter ne l'est du Soleil. Il en résulte que leurs périodes de révolution sont de 3 à 1000 fois plus courtes et se mesurent en mois voire en jours. Ensuite, certaines des orbites de ces planètes sont des ellipses très allongées par comparaison aux orbites circulaires dans le système solaire.

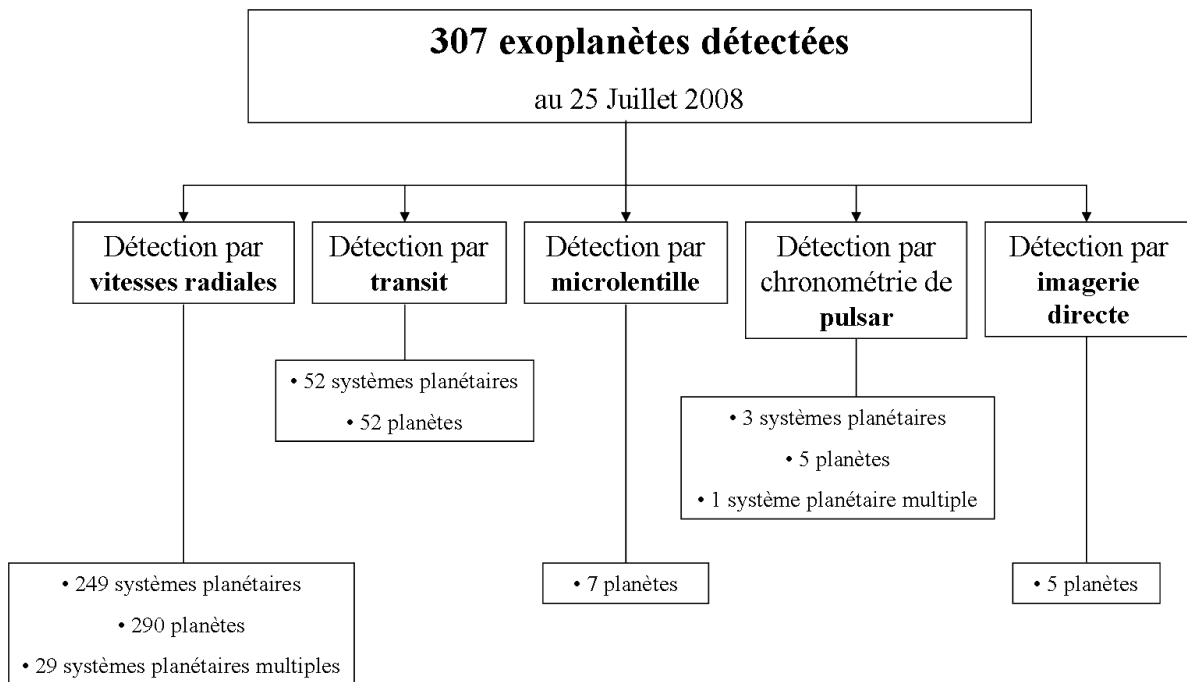


FIG. 1.1 – Inventaire des exoplanètes déjà détectées d'après l'encyclopédie des planètes extrasolaires de Jean Schneider (<http://exoplanet.eu>).

1.2 Méthodes de détection indirectes

Les moyens de détection sont dits indirects dans le sens où ce qui est observé n'est pas la planète elle-même mais l'effet, la perturbation qu'elle produit sur l'étoile autour de laquelle elle gravite.

Les trois premières méthodes exposées sont basées sur la mesure de l'effet de l'influence gravitationnelle de la planète sur son étoile hôte.

Il s'agit de :

- la méthode des vitesses radiales
- la méthode des mesures astrométriques
- la méthode de chronométrie par pulsars millisecondes

Les deux dernières se concentrent sur l'aspect photométrique de cette influence :

- la méthode des transits planétaires
- la méthode des microlentilles gravitationnelles

1.2.1 La méthode des vitesses radiales

La méthode des vitesses radiales est la première à avoir effectivement permis la détection d'une planète, par Mayor & Queloz, en 1995.

Depuis cette extraordinaire découverte, plus de 200 candidats planètes ont été détectés par cette méthode. Celle-ci représente donc actuellement le moyen le plus efficace pour la recherche de planètes extra-solaires et constitue la méthode privilégiée pour le choix des cibles des futures observations directes.

Principe : L'influence gravitationnelle d'une planète sur son étoile hôte n'est pas négligeable. En effet, l'étoile n'est pas fixe mais orbite également. Le système planétaire et l'étoile tournent ainsi tous deux autour de leur centre de gravité commun. C'est ce mouvement très faible que l'on mesure par spectroscopie, puisqu'il induit un décalage du spectre de l'étoile par effet Doppler.

Cette technique spectrométrique permet de mesurer des vitesses radiales de l'ordre de quelques $m.s^{-1}$ par corrélation de plusieurs dizaines de milliers de raies de l'étoile observée avec une étoile de référence.

Suivant les lois de Kepler décrivant le mouvement simple d'un système à deux corps, si i est l'inclinaison de l'orbite de l'étoile (et par suite de la planète) par rapport au ciel, l'amplitude mesurée K de variation du signal de vitesse radiale de l'étoile primaire est :

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{\sqrt{1 - e^2} (M_p + M_\star)^{\frac{2}{3}}} \quad (1.1)$$

avec G , la constante de Cavendish ($6.67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$), M_p , la masse de la planète, M_\star , la masse de l'étoile, P , la période orbitale et e l'excentricité orbitale.

La mesure des vitesses radiales est obtenue, comme nous l'avons cité ci-dessus, par celle du décalage Doppler du spectre de l'étoile, source en mouvement par rapport à l'observateur. Pour des changements de vitesse de l'ordre de la dizaine de $m.s^{-1}$, le décalage Doppler est très petit, de l'ordre du millième de la largeur typique des raies spectrales ($\approx 10^{-4}$ Angstroms en longueur d'onde).

Seule la combinaison d'une grande résolution spectrale, de spectres à haut rapport signal-sur-bruit et d'une approche multi-raies (grande fenêtre spectrale) pour le calcul du décalage Doppler, permet d'obtenir la précision nécessaire à la mise en évidence de perturbations planétaires.

Cette méthode est donc spécialement efficace pour des étoiles comprenant un grand nombre de raies spectrales et intrinsèquement stables en vitesse radiale, c'est-à-dire des étoiles non pulsantes.

Dans le cas de la découverte de Mayor & Queloz, les mesures donnaient $K = 54 m.s^{-1}$ et $P = 4,23$ jours pour 51 Peg :

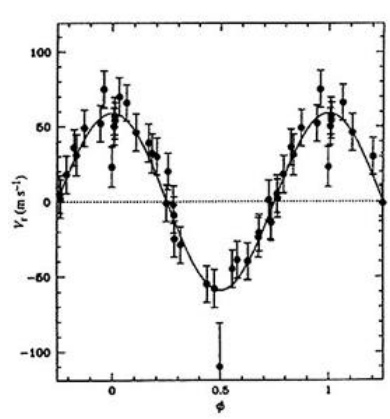


FIG. 1.2 – Mesures de vitesses radiales en fonction de la phase orbitale pour 51 Peg (Mayor et Queloz, 1995 [75]), Période = 4,23 jours, Masse = 0,45 $M_{Jupiter}$, Distance = 0,05 AU.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux planètes massives dont l'orbite est proche de leur étoile parente. La sensibilité actuelle des mesures permet une précision de quelques $m.s^{-1}$ et

est limitée par la stabilité instrumentale du décalage spectral et par le bruit de photons. Afin de diminuer le niveau de bruit, de longs temps d'intégration et des grands télescopes sont nécessaires. Ce sujet mobilise d'importants programmes d'observations au sol (HARPS, Elodie...).

1.2.2 La méthode des mesures astrométriques

Principe : La méthode consiste à mesurer les déplacements apparents d'une étoile sur le ciel (donc perpendiculairement à la ligne de visée) dus à la présence d'un compagnon planétaire. Le mouvement orbital se caractérise par la relation,

$$a_* M_* = a_{\text{planète}} M_{\text{planète}} \quad (1.2)$$

où a_* et $a_{\text{planète}}$ sont respectivement le demi grand axe de l'orbite de l'étoile et de la planète, et M_* , $M_{\text{planète}}$ leur masses. Il s'ensuit que l'amplitude angulaire θ du déplacement de l'étoile est donnée par :

$$\theta = \frac{a_*}{D} = 500 \frac{a_{\text{planète}}/5.2 \text{UA} \sin i}{D/10 \text{pc}} \frac{M_{\text{planète}}/M_{\text{Jupiter}}}{M_*/M_{\odot}} \mu\text{arcsec} \quad (1.3)$$

où D est la distance du système à l'observateur, M_{\odot} la masse du Soleil, i son l'angle d'inclinaison, et $M_{\text{planète}}$ et M_{Jupiter} les masses de la planète et de Jupiter respectivement (Jupiter étant pris comme un étalon).

On peut noter que cette technique est sensible quelle que soit l'inclinaison de l'orbite de la planète autour de son étoile, sans incertitude sur l'inclinaison du plan orbital ($\sin i$). Sa sensibilité est proportionnelle au demi-grand axe de la planète, et inversement proportionnelle à la distance du système planétaire par rapport à l'observateur, comme l'indiquent les relations précédentes.

L'astrométrie est une technique élégante pour les étoiles massives distantes. En orbite autour d'une étoile à $D=10$ parsec, Jupiter engendre un effet d'amplitude de 0.5 mas sur 12 ans, tandis qu'une planète d'orbite plus courte ou de moindre masse entraîne un déplacement d'une fraction de mas (0.3 μas pour la Terre). A ce jour, la mesure absolue de position à ces précisions n'est pas possible depuis la Terre en raison de la limite de résolution angulaire des télescopes soumis aux perturbations atmosphériques.

On peut à présent envisager des mesures astrométriques à la dizaine de microarseconde avec les grands interféromètres au sol que sont le Keck et le VLTI. Avec les futurs projets spatiaux astrométriques (GAIA de l'ESA) ou interférométriques (SIM de la NASA), on devrait atteindre une précision de l'ordre de la microarcseconde d'angle.

1.2.3 La méthode de chronométrie par pulsars millisecondes

Les pulsars millisecondes sont parmi les horloges les plus précises et les plus stables (10^{-13} s) de l'Univers. Ce sont en fait des étoiles à neutrons hautement magnétiques en rotation rapide (dont l'axe magnétique est souvent très incliné par rapport à celui de la rotation) dont le jet d'émission radio fournit à l'observateur une base temporelle de période ultra stable. Ces étoiles particulières résultent de l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives lors de leur explosion en Supernova. La présence de planètes autour de tels objets se traduit par des variations de cette période avec la vitesse orbitale. Avec les précisions instrumentales courantes, il est possible de détecter la présence d'un Jupiter ou d'une Terre. Cette technique a conduit à la première découverte d'une planète extrasolaire en 1992 autour du pulsar PSR 1257+12, où deux compagnons de masse terrestre ont été détectés (Wolszczan & Frail [107]).

1.2.4 La méthode des transits planétaires

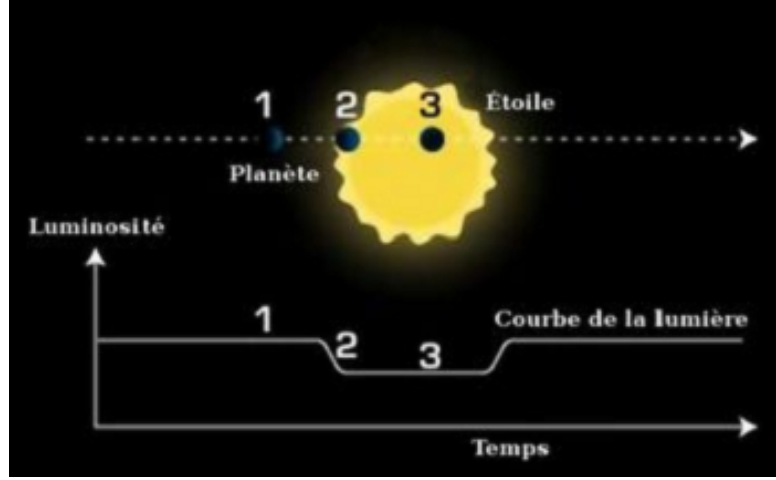


FIG. 1.3 – Principe de la méthode de détection par transit planétaire primaire (© Hans Deeg).

Le transit photométrique correspond au passage de la planète devant le disque stellaire donc à une éclipse partielle de l'étoile du point de vue de l'observateur.

Ce transit entraîne une diminution caractéristique de la luminosité $L_*(t)$, répétée à chaque période orbitale. Si l'on fait l'hypothèse d'une distribution uniforme de la brillance de l'étoile, l'amplitude de changement de luminosité ΔL est :

$$\frac{\Delta L}{L_*} \approx \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (1.4)$$

Si l'étoile est de rayon solaire, ceci équivaut à des diminutions relatives de la photométrie de $8 \cdot 10^{-5}$ et 10^{-2} pour des planètes de la taille, respectivement de la Terre et de Jupiter. Depuis la Terre, la photométrie atteint une précision de l'ordre de 10^{-3} du fait des variations de la scintillation et de l'extinction dans l'atmosphère. Un des inconvénients majeur de la méthode du transit est la condition nécessaire d'une inclinaison orbitale proche de $\pi/2$ ce qui implique que la probabilité de détecter un transit sans connaissance a priori de la géométrie du système est très faible, et explique pourquoi les efforts observationnels sont principalement dirigés vers les systèmes exoplanétaires déjà découverts par la méthode des vitesses radiales, où la période et la phase orbitale sont déjà connues.

La première détection d'un transit de planète extrasolaire a eu lieu sur le système HD209458 par Charbonneau et al. [34] (2000). Elle a conduit à une estimation précise de la masse et du rayon de la planète en transit. Sa densité, $\rho \approx 380 \text{ kg.m}^{-3}$ est en accord avec l'hypothèse d'une géante gazeuse et donne à la surface une gravité de $g \approx 9.7 \text{ m.s}^{-2}$. Cette méthode de détection devrait apporter une quantité importante de résultats grâce aux missions spatiales COROT (Convection, ROTation and planetary Transits) et Kepler qui auront pour objectif de collecter des données de plusieurs dizaines de transits planétaires, afin d'en caractériser en particulier leur atmosphère s'il y a lieu.

Le satellite COROT qui a été lancé le 27 décembre 2006, vient de découvrir sa première exoplanète appelée Corot-Exo-1b le 3 mai 2007. La figure 1.3 montre sa courbe de transit. Il s'agit d'une planète géante très chaude qui tourne en 1,5 jours autour de son étoile hôte qui est une étoile

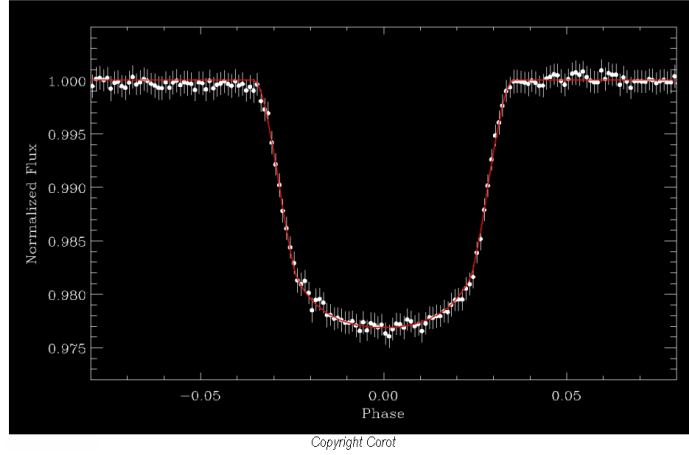


FIG. 1.4 – Courbe de transit de Corot-Exo-1b, la première planète extrasolaire détectée par le satellite COROT le 3 mai 2007.

naine analogue au soleil. Elle mesure entre 200 000 et 250 000 km de diamètre ce qui correspond à entre 1,5 et 1,8 fois le diamètre de Jupiter. De plus, des observations spectroscopiques au sol ont évalué sa masse à 1,3 la masse de Jupiter.

1.2.5 La méthode des microlentilles gravitationnelles

Le phénomène de lentille gravitationnelle s'inscrit dans le cadre de la relativité générale et a été initialement prédit par Einstein en 1911 (et 1936) puis formalisé par Refsdal (1964 [86]). L'effet de lentille gravitationnelle est la focalisation et l'amplification des rayons lumineux d'un objet lointain par un objet 'lentille' plus proche (éventuellement invisible) lorsqu'ils sont temporairement alignés avec l'observateur. Dans une configuration favorable, la présence d'une exoplanète dans le système focalisateur modifiera la courbe temporelle de la luminosité amplifiée. Cette mé-

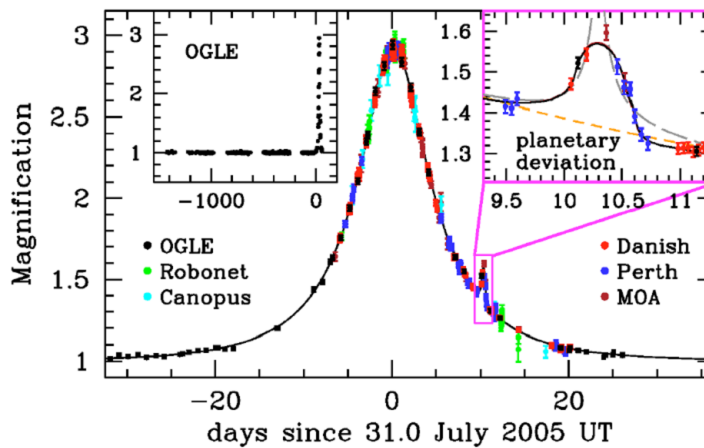


FIG. 1.5 – Courbe de lumière obtenue lors de la détection par lentille gravitationnelle d'OGLE-2005-BLG-390Lb (Beaulieu et al., 2006 [20]).

thode présente l'avantage de permettre la détection de planètes de tailles terrestres à différentes séparations autour d'une étoile lointaine. En revanche, ces observations sont non-répétables et rares : on estime que, pour une étoile située en direction du noyau galactique, la probabilité d'être amplifiée de façon significative est seulement de 10^{-6} . Néanmoins, à la suite de programmes d'observation systématique, plusieurs centaines d'évènements micro-gravitationnels ont été identifiés, quelques uns ayant conduit à l'annonce, non confirmée, de candidats planétaires (Bennett et al., 1999 [19] ; Albrow et al., 2000 [11]). En juillet 2005, Beaulieu et al.(2006, [20]) ont détecté une exoTerre appelée OGLE-2005-BLG-390Lb dont la courbe de lumière est représentée sur la figure 1.5. Cette exoplanète a une masse de $5.5 M_T$ et orbite à 2.6 AU autour d'une étoile hôte de $0.22 M_\odot$ située à 6.6 kiloparsecs.

1.2.6 Interférométrie différentielle depuis le sol avec VLTI/AMBER

Grâce au VLTI et à l'instrument de première génération AMBER (Astronomical Multiple BEam Recombiner, Petrov et al., 2000 [83]) , on espère pouvoir observer la signature astrométrique d'une exo-planète et en particulier les Pégasides (Guillot & Showman, 2002 [53]). La technique consiste à mesurer simultanément la phase des franges d'interférence dans différents canaux spectraux. Ceci revient à faire une mesure de barycentre photométrique (photocentre) différentielle en fonction de la longueur d'onde.

Le succès de cette technique repose principalement sur l'hypothèse que la planète émet son propre spectre (ceci est vrai dans l'IR thermique) et se superpose donc à celui de l'étoile. Cette contribution très faible suffit à déplacer le photocentre du système étoile/planète. Les précisions de mesures attendues pour AMBER sont de l'ordre de 10^{-4} et donc suffisantes pour détecter la présence des compagnons les plus massifs de plusieurs fois la masse de Jupiter.

L'avantage de cette technique d'imagerie à haute résolution angulaire par interférométrie est qu'elle peut résoudre des planètes très proches de leur étoile qui sont autrement non séparables par coronographie sur les plus grands télescopes.

1.3 Présentation des projets de détection directe en cours autres que la coronographie

Outre la coronographie qui sera détaillée dans le prochain chapitre, une autre technique est à l'étude pour la détection directe d'exoplanètes : il s'agit de l'interférométrie à frange noire ou nulling interferometry. Ce concept d'interféromètre multi-ouvertures proposé dès 1978 par Bracewell [30] consiste à recombinaison les faisceaux issus de chaque ouverture en les faisant interférer de manière destructive sur l'axe de l'instrument, d'où son appellation d'interféromètre à frange noire. Dans le but de pouvoir obtenir une image reconstruite du système planétaire observé, il est nécessaire de sonder l'espace des fréquences spatiales sur le plus grand nombre de points possibles. Des projets aussi bien au sol que dans l'espace sont ou ont été étudiés (Keck-Nuller, ALADDIN, DARWIN).

1.3.1 Interféromètres spatiaux DARWIN et TPF

L'objectif des missions Terrestrial Planet Finder (TPF) de la NASA et DARWIN de l'ESA est la détection et la caractérisation spectrale de planètes telluriques. DARWIN est actuellement le projet spatial le plus abouti en matière d'interférométrie à frange noire pour la détection directe d'exo-planètes. Cet interféromètre spatial à configuration variable est destiné à observer dans l'infrarouge thermique (4 à 20 μm), là où le contraste d'un exo-Jupiter ou d'une exo-Terre n'est

plus que de 10^6 (Bracewell, 1978 [30]) au lieu de 10^9 dans le spectre visible. L'interféromètre doit recombinaison les amplitudes provenant de 4 à 6 télescopes de manière à former, sur l'axe de visée de l'instrument, une frange noire projetée dans la direction de l'étoile. De nombreuses combinaisons en termes de nombre d'ouvertures et de configuration ont été étudiées (Thomas 2000) afin de trouver un compromis entre le taux d'extinction sur l'axe, la complexité d'opération (rotation ou non de l'interféromètre) et les contraintes observationnelles. Celles-ci comprennent notamment la possibilité de discriminer le signal de la planète du bulbe de lumière exo-zodiacale qui, dans l'infrarouge thermique a une contribution cent fois plus grande. En ce qui concerne TPF, on ne sait encore si l'instrument sera un coronographe dans le visible (TPF-C) où un interféromètre à longue base opérant dans l'infrarouge (TPF-I) .

Les difficultés technologiques que ces missions doivent résoudre rendent ces projets très coûteux et il est donc envisagé que TPF et DARWIN ne soient en fait qu'une seule et même mission. Pour TPF, le lancement est officiellement prévu aux alentours 2015 avec un choix final du concept adopté prochainement.

1.3.2 Les interféromètres à frange noire au sol

Dans la lignée du projet DARWIN, des projets au sol sont en cours de réalisation, et les différentes techniques de recombinaison en cours de test. Ainsi, le projet GENIE (Ground-based European Nulling Interferometer Experiment) de l'ESA et l'ESO, démonstrateur de DARWIN pour le VLTI ou l'interféromètre à frange noire du Keck-I (Keck Nuller) étaient pressentis pour devenir des précurseurs dans ce domaine. Il s'agit effectivement de développer la technologie et le savoir faire autour de ces concepts pour les futures missions spatiales.

1.4 Premiers enseignements d'une dizaine d'années de détection de planètes extrasolaires et présentation des premières planètes extrasolaires déjà imagées directement

Les premiers enseignements tirés de 10 ans de détection de planètes extrasolaires

A partir des 250 découvertes d'exoplanètes, quelques leçons intéressantes sur les propriétés de ces planètes peuvent déjà être tirées :

- proportion d'étoiles ayant au moins une planète : au moins 5% des étoiles observées révèlent la présence d'un compagnon planétaire. Cette proportion va augmenter au fur et à mesure que les observations seront capables de détecter des planètes moins massives et plus éloignées de leur étoile, par amélioration de la précision et de la sensibilité des techniques et des instruments.
- distances planète-étoile : toutes les planètes (géantes, les seules que l'on a pu détecter) découvertes à ce jour sont beaucoup plus près (jusqu'à 100 fois) de leur étoile que ne l'est Jupiter du Soleil. Cela a constitué une grande surprise car la théorie prévoit qu'une planète géante doit se former à au moins 5 UA de son étoile. Cette disparité s'explique maintenant par le phénomène de "migration" : une fois qu'une planète commence à se former relativement loin de son étoile dans le disque protoplanétaire, un phénomène d'interaction gravitationnelle entre le disque et la planète en formation se produit. Elle a pour effet de freiner la planète qui du coup se rapproche de son étoile (migration) jusqu'à ce que

l'interaction s'arrête. Ces planètes étant très proches de leur étoile, celle-ci les porte à une température élevée (jusqu'à 1200 K) d'où l'appellation "Jupiters chauds".

- excentricité des orbites : la majorité des orbites planétaires sont assez ou très excentriques ; elles forment des ellipses plus ou moins allongées au lieu d'être quasi circulaires comme dans le système solaire. On n'est pas bien sûr à ce jour en mesure de connaître l'explication de ce phénomène. Une des explications les plus vraisemblables pourrait être que si deux planètes migrent, elles le font à des vitesses différentes. Elles doivent alors forcément se rencontrer et au cours de cette rencontre l'une d'elles expulse l'autre du système planétaire. Les lois de la mécanique céleste font alors que celle qui reste a forcément une orbite elliptique.
- métallicité de l'étoile parente : les étoiles pour lesquelles on a trouvé une ou des planètes sont plus riches en éléments lourds (carbone, oxygène, fer ...) que la moyenne des étoiles. On hésite encore sur l'explication à donner à cette corrélation. Elle peut être due soit au fait que l'étoile et son cortège planétaire sont issus d'un nuage moléculaire riche en éléments lourds, soit au fait que l'étoile a été enrichie en éléments lourds par la chute de planètes.

Les premières détections directes de planètes extrasolaires et leurs propriétés

Depuis 3 ans, les premières détections directes de planètes extrasolaires constituent un tournant essentiel à l'aube des grands instruments d'imagerie directe qui fonctionneront dans les années à venir.

A ce jour, cinq exoplanètes ont pu être imagées directement :

- 2M1207-3932 b (Chauvin et al., 2004 [35] et 2005 [36], voir figure 1.6 (a))
- AB Pic b (Chauvin et al., 2005 [37], voir figure 1.6 (b))
- GQ Lup b (Neuhäuser et al., 2005 [80], voir figure 1.6 (c))
- SCR 1845 b (Biller et al., 2006 [22])
- γ Cep b (Neuhäuser et al., 2007 [81])

La table 1.1 recense les propriétés de ces premières planètes extrasolaires imagées.

Planète	2M1207 - 3932 b	AB Pic b	GQ Lup b	SCR 1845 b	γ Cep b
M [sin i] (M _{Jup})	4	13.5	21.5	8.5	1.6
Demi grand axe (AU)	46	275	103	4.5	2.17
Distance (pc)	52.4	45.6	140	3.85	13.8
Distance angulaire (arcsec)	0.877863	6.030702	0.735714	1.168831	-
Type spectral	M8	K2 V	K7eV	M8.5 V	M4
Masse (M _☉)	0.025	-	0.7	-	0.362
α	12 ^h 07 ^m 33 ^s	06 ^h 19 ^m 12 ^s	15 ^h 49 ^m 12 ^s	18 ^h 45 ^m 07 ^s	23 ^h 38 ^m 20 ^s
δ	-39° 32' 54"	-58° 03' 15"	-35° 39' 03"	-63° 57' 43"	77° 37' 56"
Mag V	20.15	9.16	11.4	17.4	

TAB. 1.1 – Propriétés des premières exoplanètes détectées par imagerie directe.

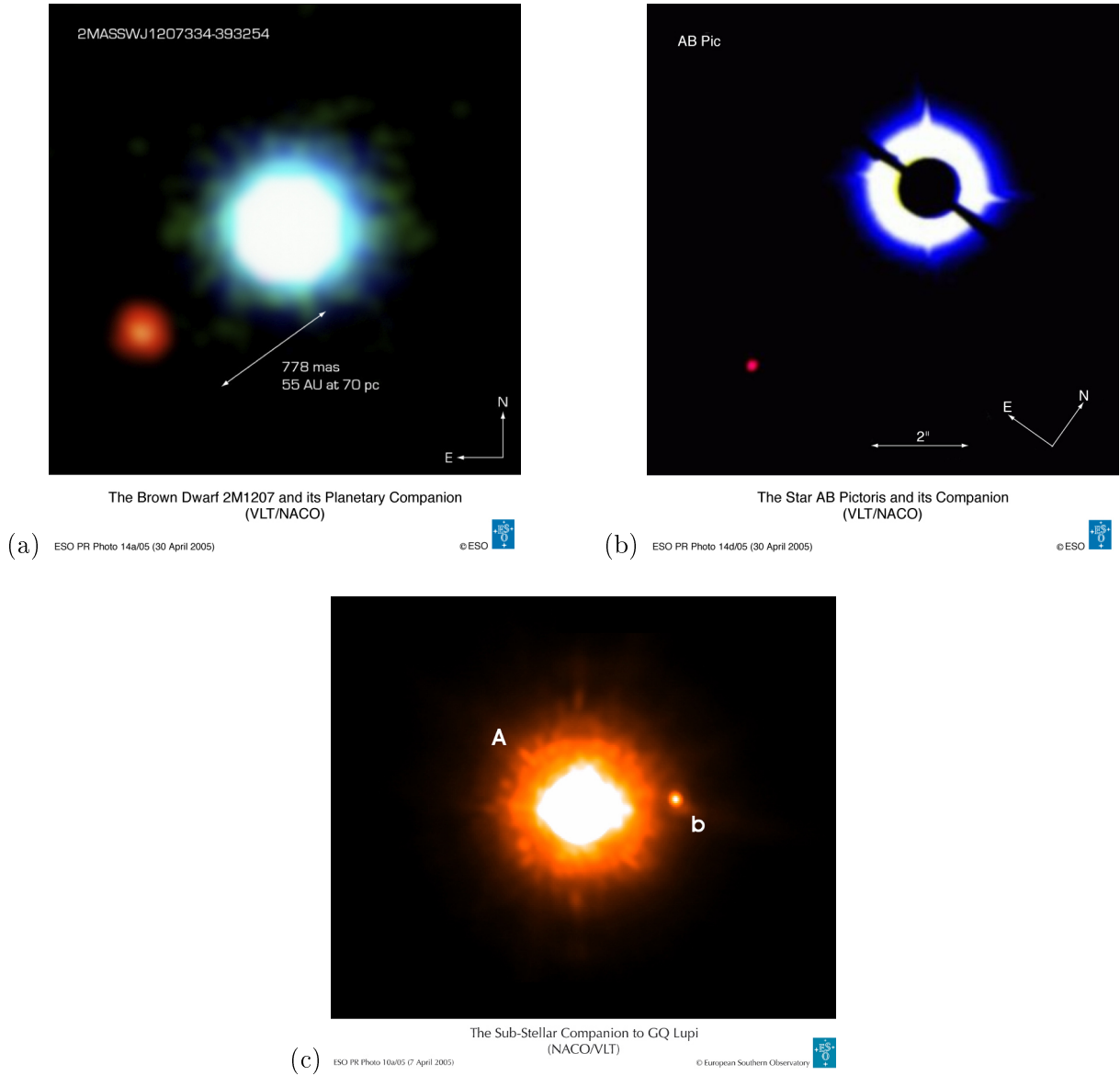


FIG. 1.6 – Images des 3 premières planètes extrasolaires imagées directement par l'instrument NAOS-CONICA du VLT : (a) 2M1207 b, (b) AB Pic b, (c) GQ Lupi b.

Bien entendu, des études complémentaires sont à mener afin tout d'abord de confirmer ces caractéristiques et aussi d'en savoir plus sur ces objets. Ces premières planètes pourront aussi servir d'étoiles cibles "de référence" pour le dimensionnement des futurs instruments imageurs dont les premières lumières sont attendues d'ici quelques années.

1.5 Intérêt de la coronographie pour la détection d'exoplanètes

Dans le cadre de la recherche d'exoplanètes, c'est la méthode indirecte des vitesses radiales qui a permis pour l'instant d'en détecter la majorité. Cependant cette technique ne permet de détecter que des planètes massives et proches de l'étoile centrale, et au sein de ces détections on ne peut accéder qu'à quelques paramètres comme par exemple leurs masses et leurs distances à l'étoile. Les nouvelles techniques instrumentales dites de détection directe qui sont en cours de développement et qui sont fondées sur les principes d'interférométrie et de coronographie, permettront la détection d'un plus nombre d'exoplanètes, moins massives et/ou plus éloignées de leur étoile hôte.

En outre, les paramètres observables sont différents selon la méthode de détection utilisée et l'imagerie pourra combler certains manques, surtout en ce qui concerne les propriétés physiques de la planète comme ses caractéristiques de surface ou la composition de son atmosphère.

Ainsi, la coronographie, et par extension toute méthode de détection directe d'exoplanète, est complémentaire aux méthodes de détection indirecte.

L'imagerie directe permet de mesurer le flux de la planète et de ce fait de déterminer ses caractéristiques comme son diamètre, son albédo ou sa température de surface. Il sera aussi possible d'effectuer des mesures spectroscopiques permettant ainsi d'estimer la composition chimique de la planète puis de rechercher des bio-traceurs et donc la vie.

Chapitre 2

Principes de Coronagraphie

Sans système coronagraphique, la lumière issue d'une planète est masquée dans les ailes de l'image de l'étoile centrale : les différents coronagraphes présentés ici suppriment ou au moins réduisent fortement l'intensité des ailes de la PSF (ou réponse impulsionnelle du télescope) de l'étoile. Il est ainsi possible d'augmenter le temps de pose et aussi le rapport signal à bruit relatif à la planète.

2.1 Coronagraphie de Lyot

2.1.1 Historique

La rareté des éclipses totales de soleil, leur courte durée et les distances à parcourir lorsqu'on veut les observer ont amené les scientifiques à chercher, dès 1878, une méthode pour pouvoir étudier la couronne à tout moment.

Il fallut attendre 1929 et les travaux de Lyot [70] sur la polarisation de la couronne solaire pour que le concept du coronographe soit introduit.

L'idée principale est simple : occulter par une pastille opaque l'objet aveuglant afin de pouvoir observer ses alentours.

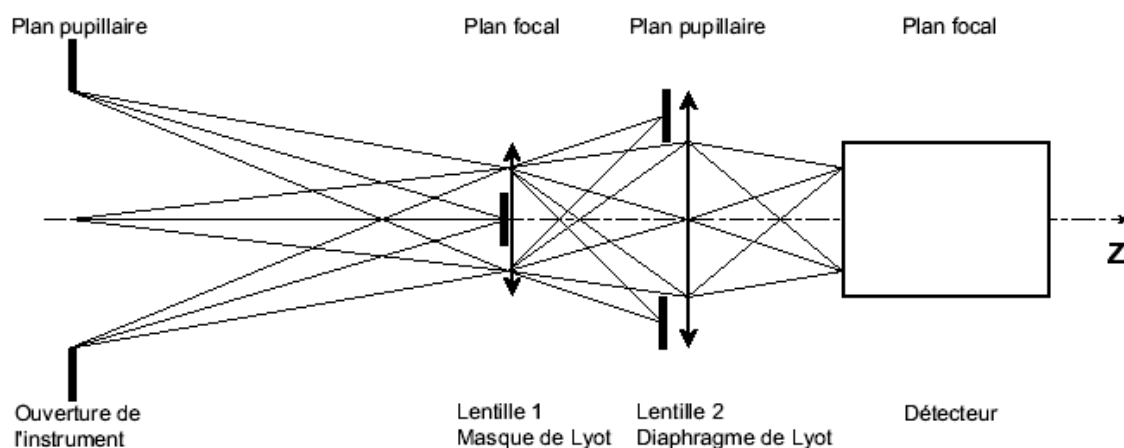


FIG. 2.1 – Schéma optique général d'un coronographe de Lyot.

Si on se contente de placer un masque sur cette image, l'intensité du disque solaire sera certes considérablement réduite, mais il ne va en rien diminuer les résidus de diffraction produits par l'optique en amont : ceci est visible si on reprend l'image de la pupille illuminée par l'objet. Ce plan pupille met à jour l'effet diffractant du masque physique (masque d'amplitude) placé dans le plan image. Pour le masque de Lyot, cet effet se traduit par une concentration de l'énergie lumineuse sur les bords de la pupille. C'est ce que constate Lyot, qui place alors dans ce plan un diaphragme (communément appelé diaphragme de Lyot ou Lyot stop) qui va absorber une partie de cette énergie. Si l'on reforme l'image de l'objet à l'aide d'une optique, placée juste derrière ce plan pupille, on constate que l'on a pu considérablement atténuer l'intensité du résidu de diffraction produite par le masque occultant.

Les coronographes solaires actuels sont encore tous basés sur le schéma initial de Lyot. Ces instruments ont permis des succès scientifiques et observationnels sans précédents, en témoigne l'engouement actuel pour le satellite SOHO qui permet une surveillance continue du soleil.

2.1.2 Le coronographe de Lyot stellaire

L'application de la coronagraphie de Lyot à l'observation des environnements stellaires est immédiate, la différence étant la taille de l'objet occulté. En général, les dimensions angulaires des étoiles les plus proches sont en deçà de la limite du pouvoir de résolution des plus grands instruments à pupille compacte. Il suffit donc de placer un masque occultant qui a les dimensions de la figure de diffraction dans un plan image. De la même manière que pour le coronographe solaire, l'énergie lumineuse n'est vraiment réduite qu'après avoir placé un diaphragme sur une image de la pupille.

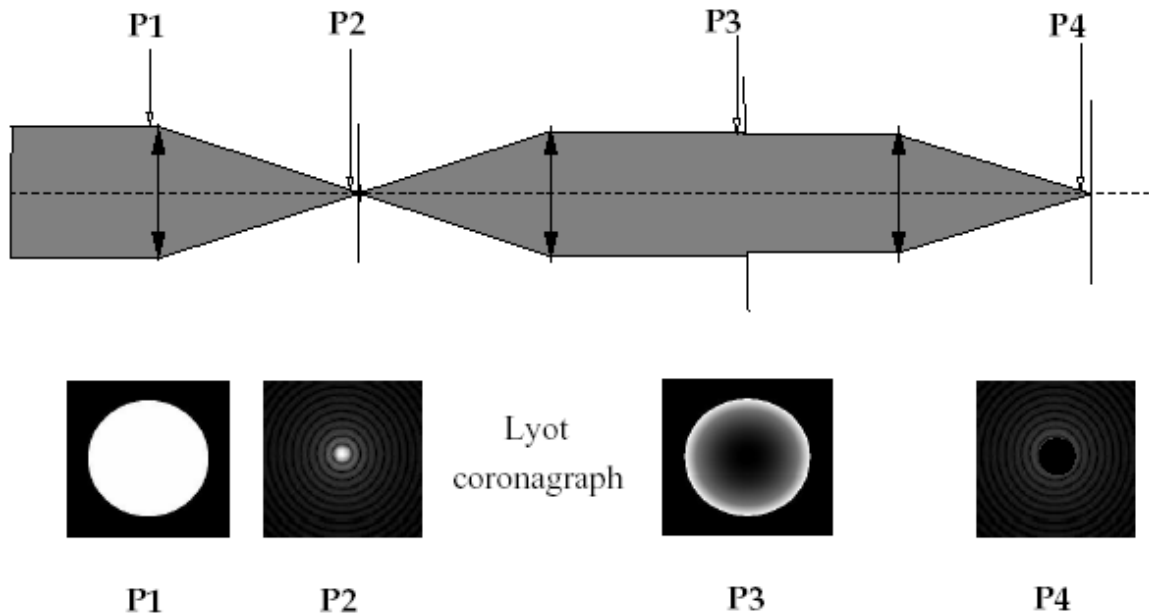


FIG. 2.2 – Distribution d'intensité dans les différents plans focaux et pupillaires : le plan P1 correspond au plan pupillaire d'entrée; le plan P2 est le plan focal où se trouve le masque occultant; le plan P3 est le second plan pupille où l'on place le diaphragme de Lyot et le plan P4 est le second plan focal (figure issue de Guyon et al., 1999 [54]) .

Le coronographe de Lyot est actuellement la seule technique systématique permettant d'obtenir une extinction suffisante pour une exploitation astrophysique sur des objets autres que le Soleil. Cependant, des limitations évidentes apparaissent, même dans l'espace, pour l'observation directe de planètes extra-solaires :

- Premièrement, la taille du masque ne permet pas d'accéder à l'environnement proche des étoiles (à l'échelle de la résolution angulaire de l'instrument). Il est nécessaire de masquer l'objet brillant central jusqu'à deux ou trois anneaux de la tache de diffraction (Malbet [72], 1996) si l'on veut espérer obtenir de bonnes performances.
- La seconde limitation concerne la dynamique qui n'est pas suffisante proche de la source brillante pour l'observation directe d'objets très faibles, comme dans le cadre de la recherche et de l'imagerie directe d'exo-planètes où le contraste peut atteindre 10^9 dans le spectre visible (cas d'une exo-Terre ou d'un exo-Jupiter). Néanmoins, diverses observations ont montré l'intérêt du coronographe de Lyot lorsqu'il s'agit d'étudier des objets diffus étendus comme les disques de gaz ou de poussière (Mouillet et al., 2001 [78]). La faible sensibilité de cette technique aux erreurs de centrage (*tip-tilt*) en fait un outil intéressant pour la coronagraphie au sol (Boccaletti et al., 2002 [24]).

C'est ainsi que dans le but de dépasser ces limites, de nouveaux types de coronographes ont été développés depuis les années 90. Beaucoup de concepts ont été proposés, je vais présenter les principaux dans les sections qui suivent.

2.2 La coronagraphie interférentielle

La coronagraphie interférentielle utilise les propriétés de cohérence du front d'onde pour produire une interférence la plus destructive possible pour un objet situé sur l'axe de visée et ainsi différencier la lumière d'une étoile de la lumière du compagnon de cette étoile. Ce processus interférentiel nécessite bien entendu que la lumière provenant de la source principale soit cohérente, ce qui est toujours le cas si les images ne sont pas résolues.

2.2.1 Le coronographe de Roddier & Roddier ou à masque de phase

Comme on peut le voir sur la figure 2.3, le schéma de principe est le même que pour le coronographe de Lyot. La différence vient du fait qu'au niveau du premier plan focal, le masque opaque est remplacé par un masque de phase circulaire qui déphase de π la lumière qui le traverse (Roddier & Roddier, 1997 [89]).

Lorsque le masque de phase possède la taille correcte, des interférences destructives se produisent à l'intérieur de la pupille entre la lumière qui traverse le masque et celle qui ne le traverse pas. Au niveau du second plan pupille, la lumière issue de l'étoile est rejetée à l'extérieur de la pupille. Le diamètre théorique optimum du masque de phase est de 43% du premier anneau de la figure d'Airy soit $1.06\lambda/D$ (Guyon et al., 1999 [54]). Dans le cas idéal d'une source ponctuelle monochromatique, d'une taille de masque optimale et pour une pupille d'entrée circulaire, le taux d'extinction atteint 160. Ceci s'explique en regardant sur la figure 2.3, la distribution d'intensité dans le plan C : cette dernière n'est pas plate à l'intérieur de la pupille mais possède une courbure positive sur cette représentation. Les tests en laboratoire de ce coronographe ont été effectués en 1999 (Guyon et al. [54]) mais les faibles performances d'extinction (≈ 20) n'ont pas pour l'instant donné suite à de nouvelles réalisations.

Les limitations majeures de ce coronographe sont la dépendance en longueur d'onde du déphasage et de la taille du masque (chromatisme). Cependant, ce coronographe est plus efficace

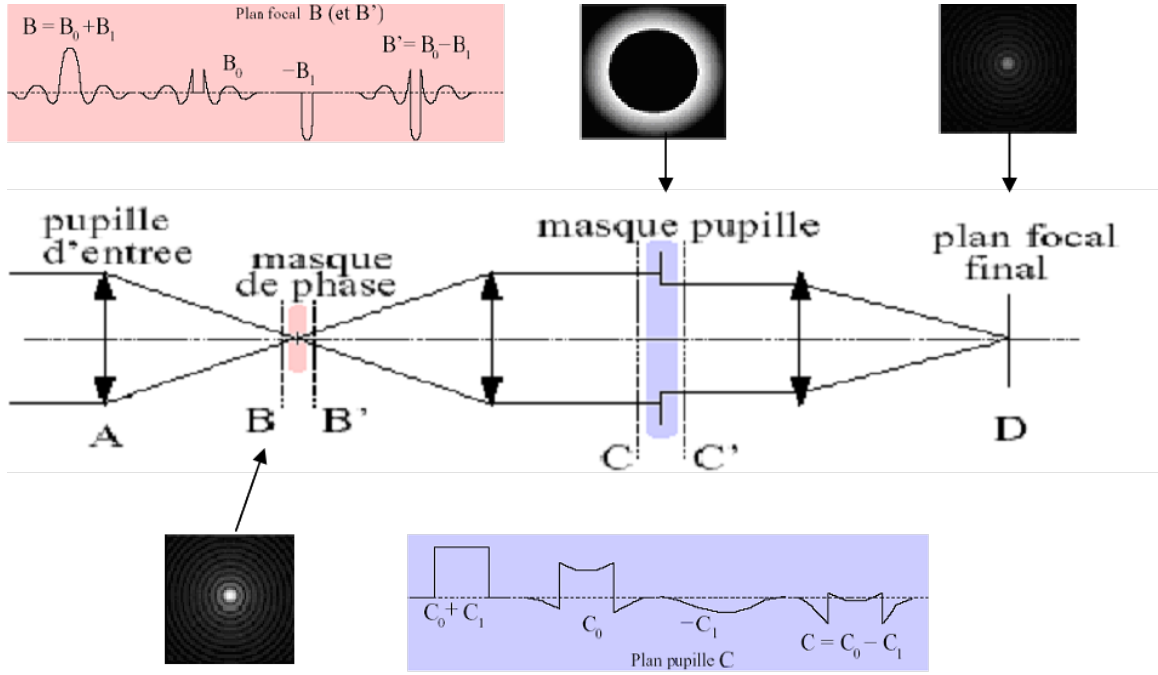


FIG. 2.3 – Principe du Coronapgraphe à masque de phase et distribution d'intensité au niveau des différents plans (Thèse O. Guyon, 2002).

en terme de collecte de photons de la planète car il nécessite un diaphragme pupillaire de Lyot moins limitatif.

Des améliorations de ce coronapgraphe ont été proposées pour passer outre ces limitations : il ainsi possible d'obtenir une extinction totale du résidu stellaire en apodisant la pupille d'entrée (Soummer et al., 2003a [97], voir section 2.3) et, de plus, le coronapgraphe à masque de phase dit à double zone (Soummer et al., 2003b [98]) s'affranchit du double chromatisme du coronapgraphe de Roddier & Roddier. Des tests en laboratoire de ce coronapgraphe double zone sont en cours.

2.2.2 Le coronapgraphe à 4 quadrants

Principe : Le principe de base de ce coronapgraphe reprend le concept de masque de phase de Roddier & Roddier mais adopte une géométrie complètement différente. En effet, la pastille circulaire déphasante est remplacée par un masque quatre quadrants qui divise le plan focal en quatre parties égales : deux quadrants sur une diagonale font subir à la lumière incidente un déphasage de π , les deux autres la laisse passer sans déphasage (Rouan et al., 2000 [90]). En supposant que l'image de l'objet brillant est parfaitement centrée à l'intersection des quatre quadrants, les quatre faisceaux de lumière interfèrent destructivement à l'infini. La lumière résiduelle est rejetée en dehors de la surface pupillaire, avec une contribution plus importante sur les bords. Les grandes limitations de ce dispositif sont la chromaticité du déphasage à introduire et la sensibilité aux effets de basculement du front d'onde et aux obstructions centrales (ce qui est aussi le cas du coronapgraphe de Roddier & Roddier).

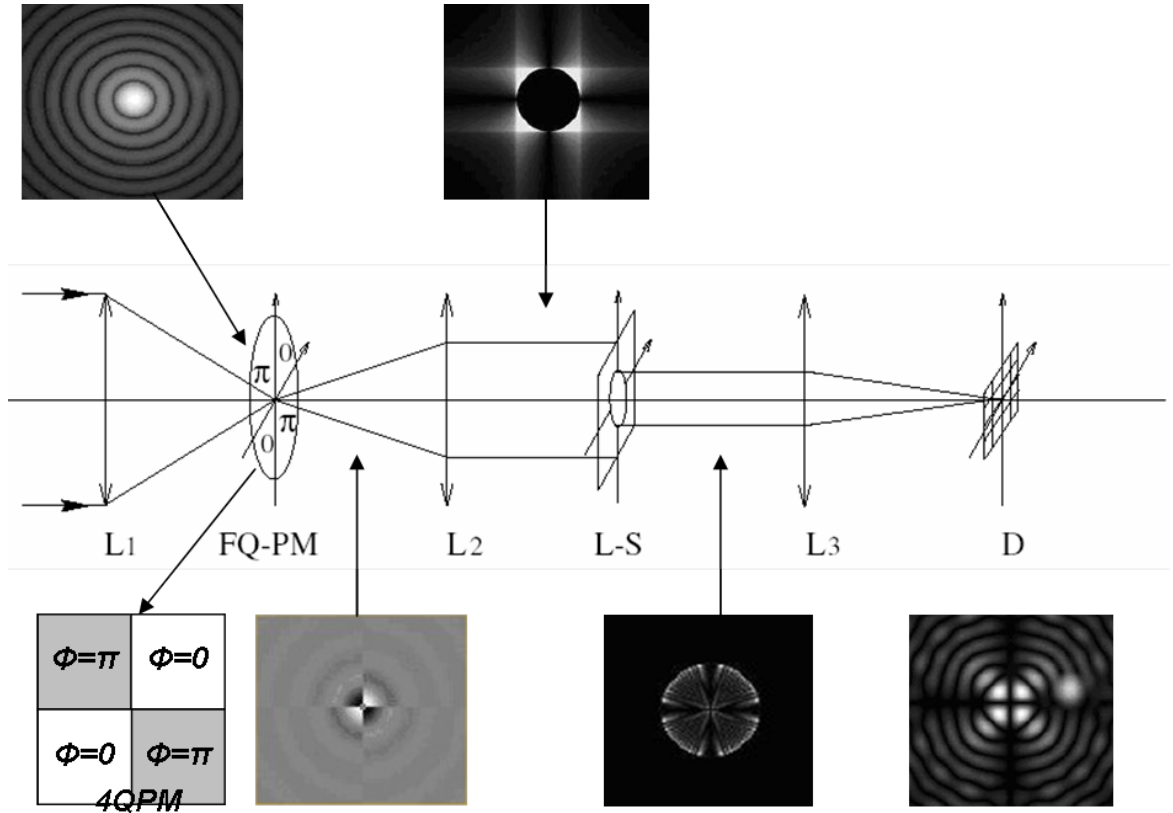


FIG. 2.4 – Schéma optique du coronographe à quatre quadrants et distribution d'intensité associées dans le cas où un compagnon de 15 magnitudes plus faible (rapport de flux de 10^6) est situé à $2.1 \lambda/D$ de l'étoile (Rouan et al., 2000 [90]).

2.2.3 Le coronographe à couteau de phase achromatique (APKC)

Le principe est similaire à celui du quatre quadrants ; la différence vient du fait qu'une paire de 2 quadrants orthogonaux remplace le masque divisé en 4 quadrants. Les déphasages ainsi produits sont de 0 , π , 2π , 3π dont l'effet d'interférence destructive dans le plan pupille conjugué est identique au 4 quadrants. Le résultat en terme de réjection est absolument identique au 4 quadrants mais le fait de diviser son action en deux permettrait de rendre le coronographe achromatique (Abe et al, 2001 [1]). Une étude détaillée de ce coronographe sera présentée dans la partie III.

2.2.4 L'Annular Groove Phase Mask (AGPM)

L' Annular Groove Phase Mask (AGPM) est un concept récent proposé par Mawet et al. (2005 [76]). Son principe est d'utiliser un réseau sub-lambda d'ordre zéro afin de supprimer les zones de transition du 4QPM (qui engendrent une atténuation) et surtout d'achromatiser le déphasage. Un réseau sub-lambda d'ordre zéro est connu pour être biréfringent c'est-à-dire que la lumière qui le traverse voit un milieu continu ayant deux indices de réfraction différents. Cet effet étant chromatique, il est possible d'ajuster la géométrie du réseau afin de créer un milieu biréfringent pouvant déphaser de π sur une large bande spectrale : pour ce faire, il faut implémenter des réseaux concentriques à motif circulaire.

2.2.5 Le Coronographe Interférentiel Achromatique (CIA)

Ce coronographe, proposé en 1996 par Gay et Rabbia [46] utilise un interféromètre de Michelson modifié. Dans une des voies de l'interféromètre, on introduit un passage par un foyer réalisé par un système dit à œil de chat. De ce passage au foyer résulte une rotation de 180° de la pupille et un déphasage de π achromatique (Baudoz et al., 2000 [15]). La rotation de la pupille va "symétriser" ce front d'onde par rapport à l'axe. Lors de la recombinaison, les deux fronts d'onde interfèrent de manière destructive pour un objet se trouvant sur l'axe. Un objet hors de l'axe, pourvu qu'il ne se trouve pas trop près de celui-ci ($\geq 0.3 \lambda/D$) n'est pas, ou peu affecté par le phénomène interférentiel jusqu'à une fraction de la tache de diffraction de l'instrument. En raison de l'effet de centro-symétrisation, l'image de l'objet donnée par le coronographe est dédoublée.

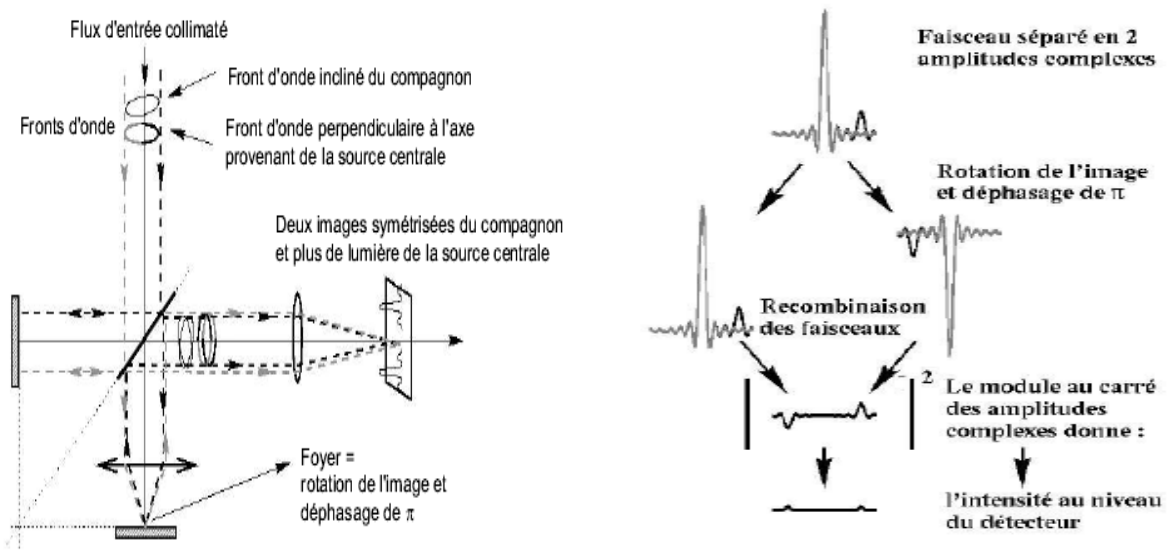


FIG. 2.5 – Principe de fonctionnement du CIA (<http://www.oca.eu/baudoz/coro/coro.html>).

Il existe trois imperfections majeures à ce dispositif (Gay [46]). Tout d'abord, en raison de la séparatrice, il n'y a réjection que de la moitié de la lumière incidente et la transmission est intrinsèquement limitée puisque le flux de l'objet au plan focal n'est plus que le quart de ce qu'il était dans la pupille d'entrée. De plus, la symétrisation de l'image coronagraphique engendre une perte des véritables orientations. Enfin, le maintien de la différence de marche nulle est délicat à réaliser.

Par ailleurs, Gay et al. (Rabbia et al., 2007 [85]) et Tavrov et al. (2006 [101]) ont récemment présenté deux nouveaux concepts dérivés de ce principe présentant l'avantage d'être plus compacts.

2.3 Coronagraphie à ouvertures apodisées ou coronagraphie d'amplitude

Apodiser une pupille consiste à modifier sa transmittance de manière à faire en sorte que les pics secondaires de la réponse impulsionnelle du télescope soient atténués au moins sur l'axe. L'apodisation est une technique connue depuis fort longtemps en optique et en spectroscopie

(Jacquinot). C'est plus récemment que son intérêt en coronographie stellaire a été mis en avant.

2.3.1 Apodisation par des fonctions prolates

En 2003, Soummer et al. [97] ont prouvé que l'apodisation de la pupille d'entrée est une solution efficace pour améliorer l'extinction des coronographes de Lyot et Roddier & Roddier. Dans le cas d'un coronographe à ouverture circulaire apodisée, la solution pour la fonction apodisante est donnée par les fonctions prolates sphéroïdales circulaires développées par Slepian et Pollak (1964, [94]). La propriété importante de ces fonctions prolates est qu'elles sont invariantes par transformation de Fourier.

D'une manière générale, l'apodisation permet au moins de gagner un facteur d'extinction de 100 de la lumière de l'étoile centrale mais elle se paye en élargissement du pic central et en perte de flux (Soummer et al., 2003a [97]).

Pour le coronographe de Roddier & Roddier apodisé, il existe une solution exacte unique qui conduit à une extinction totale. Dans ce cas, le taux d'énergie sortante de la pupille d'entrée est $T_{RR}=72.6\%$ et la perte de résolution due à l'apodisation est très faible : elle est de l'ordre de 5% puisque que le premier zéro de la PSF est à $1.28 \lambda/D$. La conservation de l'énergie impose que l'énergie stellaire soit totalement rejetée à l'extérieur de l'ouverture pupillaire dans le second plan pupille et donc éliminée par le diaphragme de Lyot.

Pour le coronographe de Lyot apodisé (PALC ou Prolate Apodised Lyot Coronagraph), il n'y a pas de solutions exactes appropriées qui conduisent à une extinction totale : on se contente donc de solutions approximées. Le résultat surprenant est que l'amplitude résiduelle dans le plan pupille est elle-même proportionnelle à la fonction prolate initiale. L'effet global d'un PALC est simplement un coefficient d'atténuation pour le point source sur l'axe.

L'intensité résiduelle de l'étoile est elle-même apodisée. De plus, dans le plan pupille coronographié, l'énergie est maximale concentrée dans une surface équivalente au masque coronographique. C'est ici une différence importante par rapport au coronographe classique de Lyot pour lequel l'intensité résiduelle de la pupille dans le plan pupille coronographié est maximum au bord de la pupille (effet opposé de l'apodisation).

C'est pourquoi l'apodisation par les fonctions prolates constitue la solution optimale pour la coronographie de Lyot en terme de concentration maximale de l'énergie stellaire résiduelle. Une autre différence avec le coronographe de Lyot classique est la taille du masque occultant qui est toujours plus petite que celle de la figure de diffraction.

En pratique, l'apodisation consiste à rajouter un masque derrière la pupille du télescope ayant la transmittance désirée ce qui est assez difficile à réaliser techniquement.

2.3.2 Apodisation par reconfiguration de pupille : le Phase Induced Amplitude Apodization Coronagraph (PIAAC)

Ce concept a été proposé en 2003 par Guyon [56]. L'apodisation est effectuée par passage sur deux miroirs asphériques et présente l'avantage d'obtenir une transmission de l'ordre de 100% puisque l'apodisation s'effectue par la phase ainsi qu'un faible angle minimal de détection ($\leq 2\lambda/D$).

2.3.3 Autres configurations

De nombreuses formes de pupille et des techniques apodisantes (Kuchner [65]) ont été trouvées depuis l'avènement de la coronographie. On peut citer l'Apodized Square Aperture, les pupilles de Jacquinot ou de Spergel ou l'apodisation par des masques pupillaires binaires. Leur principe

théorique laisse présager des résultats intéressants en terme de réjection de la lumière ; cependant elles sont difficiles à réaliser techniquement.

2.4 Terminologie pour l'évaluation des performances coronographiques

Afin d'interpréter les résultats des mesures coronagraphiques, plusieurs critères généraux d'évaluation des performances coronagraphiques ont été définis.

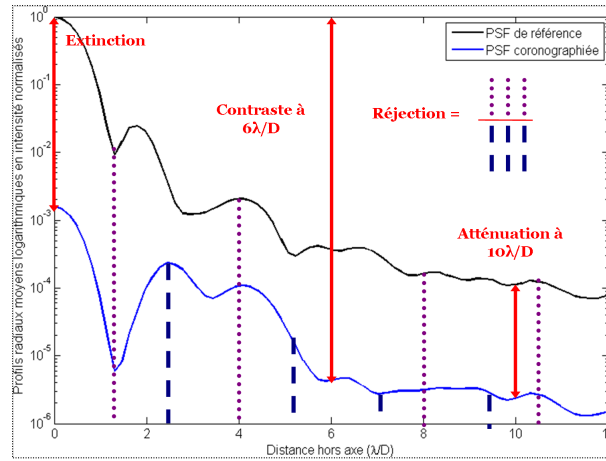


FIG. 2.6 – Illustration des différents critères d'évaluation des performances coronagraphiques.

Ici, je présente uniquement les plus connus (dont on peut voir une illustration sur la figure 2.6) :

- Extinction : ce critère permet d'estimer une limite inférieure du contraste dans l'image. On peut la définir comme :

$$Extinction = \frac{Maximum (Image non coronographiée)}{Maximum (Image coronographiée)}$$

Ce critère n'est pas pertinent dans tous les cas (par exemple pour le coronographe de Lyot) car il faut aussi regarder le comportement de la réponse coronagraphique dans le halo de diffraction.

- Réjection mesurée dans la pupille coronagraphique : rapport d'énergie passant au travers du diaphragme de Lyot avec et sans masque coronagraphique. Il s'agit d'un critère énergétique jugeant l'efficacité globale du dispositif coronagraphique.
- Réjection mesurée dans le plan focal coronagraphique : rapport de la quantité d'énergie dans l'image focale finale avec et sans masque coronagraphique.
- Atténuation locale : elle mesure localement le gain en intensité dû au coronographe et permet ainsi d'estimer le contraste dans l'image. On peut la définir comme :

$$Atténuation (r, \theta) = \frac{I_{Image non coronographiée} (r, \theta)}{I_{Image coronographiée} (r, \theta)}$$

Elle dépend fortement du coronographe utilisé.

- Contraste : il s'agit aussi d'un critère local d'efficacité. On peut le définir comme :

$$\text{Contraste}(r, \theta) = \frac{\text{Maximum}(\text{Image non coronographiée})}{I_{\text{Image coronographiée}}(r, \theta)}$$

- Détectabilité : elle traduit l'efficacité à extraire le signal du compagnon du halo de speckle de la PSF. On peut la définir comme :

$$\text{Détectabilité}(r, \theta) = \frac{\text{Maximum}(\text{Image non coronographiée})}{\sigma(I_{\text{Image coronographiée}}(r, \theta))}$$

où σ correspond à l'écart type.

Il convient de préciser que "non coronographiée" signifie "sans action du masque coronographique" en sous-entendant que tout le train optique en aval reste identique (Lyot stop compris). Nous verrons par la suite qu'il peut y avoir une très grande différence entre ces valeurs et qu'il est difficile de définir "le" critère pertinent et général de quantification et d'évaluation des performances d'un coronographe. Cette difficulté vient du fait que la réponse impulsionnelle coronographique est très fortement non linéaire. De plus, une difficulté supplémentaire est qu'un objet situé hors-axe subit lui aussi l'effet du coronographe ; ainsi on définit aussi l'angle minimal de détection ou Inner Working Angle comme étant la distance angulaire pour laquelle la transmission du compagnon est supérieure à 50%. Dans la suite de ma thèse, j'utiliserai principalement comme critère l'extinction et la réjection qui, à défaut d'être les plus pertinents, sont ceux qui sont les plus connus par la communauté astronomique.

2.5 Limitations principales et comparaison des différents coronographes

Tous les résultats énoncés précédemment concernent le cas parfait d'une pupille circulaire et d'un front d'onde plan.

Or les différentes simulations et tests en laboratoire ont montré que la limitation majeure des techniques coronographiques est l'extrême sensibilité aux effets de la turbulence atmosphérique après correction par optique adaptative, notamment celui de tip-tilt ou de basculement du front d'onde qui est responsable des déplacements de l'image donc des fluctuations de position autour de l'axe optique du coronographe. Ceci implique que l'optique adaptative devrait être idéalement parfaite et, de ce fait, que les résidus de turbulence atmosphérique non corrigés par l'optique adaptative doivent être minimisés.

Un autre inconvénient est la configuration de la pupille du télescope. En effet, les obstructions pupillaires qui réinjectent de la lumière dans le second plan pupille dégradent ainsi les performances d'extinction de la plupart des coronographes, notamment ceux à masque de phase.

Parmi les autres limitations, on peut aussi citer les aberrations optiques et spécialement la lumière diffusée due à l'erreur de phase introduite par les miroirs à différentes échelles spatiales. Il faut aussi rappeler pour les coronographes à masque la chromaticité de la PSF et des déphasages à introduire.

Le tableau 2.1 présente un tableau qualitatif des différents coronographes en essayant d'être le plus objectif possible. Il est à noter que les différentes rubriques n'ont pas le même poids pour l'estimation des qualités des différents dispositifs.

Caractéristique	4QPM	APKC	CIA	Roddier & Roddier	Lyot
Concept optique	Masque de phase	2 masques de phase	Interféromètre de Michelson	Pastille de phase	Masque occulteur
Taux de réjection	$> 10^6$	$> 10^6$	$> 10^6$	$10^4/10^6$	$10^2/10^4$
Contraste à λ/D	> 44000	> 3000	> 1000	$> 100/10000$	$> 100/1000$
Contraste à $3\lambda/D$	$\approx 4 \cdot 10^5$	$\approx 3 \cdot 10^4$	$\approx 10^4$	$\approx 10^5$	$\approx 10^4$
Contraste à $5\lambda/D$	$\approx 10^6$	$\approx 10^6$	$\approx 10^6$	$\approx 10^6$	$\approx 10^6$
Résultats en labo	44000	3000	1000	16	
Résultats sur le ciel	16	32	100		100
Transmission	0.9	0.75	0.25	0.9/ 0.4	0.9/ 0.4
Chromatisme	- -	- -	0	- - - -	0/-
Effets des erreurs de surface	- -	- -	- - -	- -	-
Effets du dépointage	- - -	- - -	- - - -	- -	-
Effets du piston/tip-tilt	- - -	- - -	- - -	- -	-
Effets de la diffusion	-	-	-	-/- -	-/- -
Effets de l'obstruction centrale	- - -	- - -	0	0	0/-

TAB. 2.1 – Comparaison qualitative des coronographes existants : 0, -, - -, - - - et - - - - correspondent respectivement à non, peu, moyennement, beaucoup et très sensible à.

2.6 Principaux facteurs limitant la détection à fort contraste

Les principaux facteurs limitant la détection à fort contraste et, de ce fait, à la coronagraphie, sont (Malbet et al., 1996 [72]) :

- le bruit de speckle résiduel : il s'agit de variations des ailes de la PSF à de petites échelles temporelles (ms) dues aux perturbations engendrées par le front d'onde turbulent résiduel
- les aberrations introduites par les optiques : à grande échelle temporelle (de l'ordre de la seconde à la minute), des variations des ailes de la PSF sont également générées par des aberrations optiques introduites aux fréquences spatiales par les éléments optiques présents du miroir primaire jusqu'au détecteur
- le bruit de photons associé à la planète et aux résidus de diffraction de l'étoile sur l'axe
- le bruit de photons associé à l'émission du fond de ciel
- le bruit de lecture des détecteurs

Les trois premiers items sont dominants pour l'observation du voisinage proche des objets brillants. Différentes techniques sont développées pour réduire tous ces bruits, je les présente dans la section suivante.

2.7 Techniques complémentaires à la coronagraphie et post-traitements

2.7.1 Dark Speckle ou la méthode des tavelures noires

Il s'agit d'une méthode statistique inventée par A. Labeyrie (1995 [66]). Elle se base sur la constatation qu'une interférence hautement destructive peut se produire occasionnellement en un point du plan focal d'un instrument, coronographié ou non, créant ainsi une tache noire dans la forêt de tavelures que l'on y trouve. En effet, la tache de diffraction réelle n'est jamais en pratique la belle figure d'Airy académique et parfaite car même des optiques très bien polies génèrent des défauts de phase résiduels de très faible amplitude. Ainsi, au centre on retrouve

bien sur le pic central, mais autour de lui et à mesure que l'on s'éloigne, il apparaît une structure de tavelures statiques ou lentement variables. Ces tavelures résultent de l'addition de vibrations mutuellement cohérentes mais déphasées aléatoirement.

Lorsque cette interférence aléatoire hautement destructive se produit en un point du plan focal où se trouve le propre pic d'Airy d'un éventuel compagnon, l'éclairement résiduel n'est plus celui du spot noir mais la somme des deux. La répétition de ces événements, en raison des fluctuations du seeing, peut être détectée comme une anomalie statistique locale révélant la présence d'un objet faible, une planète extra-solaire par exemple (Boccaletti et al., 1998 [23]).

2.7.2 Dark Hole ou la méthode des trous sombres

Le principe du Dark Hole consiste à atténuer localement l'intensité de lumière diffusée par les imperfections des surfaces optiques dans une zone définie du champ coronographié de manière à améliorer le contraste entre le compagnon et l'étoile centrale (Malbet et al., 1995 [71]). Le principe de cette méthode se situe à mi-chemin entre ceux des systèmes d'optique active et d'optique adaptative. En théorie, un tel procédé permettrait de gagner un facteur de l'ordre de 10 à 20 localement. Il nécessite cependant de pouvoir agir sur un grand nombre de sous ouvertures de la pupille, typiquement 50*50 éléments de résolution au sol avec une précision sur la dynamique des actuateurs de l'ordre du nanomètre.

2.7.3 Soustractions centro-symétriques

Ce traitement se base sur la constatation que la figure de tavelures résiduelles au foyer des coronographes tend à être centro-symétrique (Rouan [90]) : elle peut donc être retirée par soustraction de l'image centro-symétrique. Dans la pratique, cette constatation est d'une portée considérable. En effet, cela voudrait dire que le bruit de speckle pourrait être calibré en temps réel et que les données coronagraphiques ne nécessiteraient plus la (sempiternelle) soustraction par une étoile de référence.

2.7.4 Imagerie différentielle simultanée

L'imagerie différentielle consiste à utiliser deux images simultanées prises dans deux longueurs d'onde différentes mais suffisamment proches pour que l'effet des aberrations résiduelles (i.e. non corrigées par l'optique adaptative) soit identique dans les deux images. La différence de ces deux images permet l'annulation du signal causé par les aberrations résiduelles et fait ainsi ressortir le signal venant d'un éventuel compagnon gravitant autour (Racine et al., 1999 [84]; Marois et al., 2000 [73]). Le compagnon doit donc présenter une signature spectrale dans une des longueurs d'ondes choisies. Selon les modèles prédits par les astronomes, la raie du méthane satisfait cette condition. La formulation du modèle direct va permettre de prendre en compte les aberrations résiduelles de l'optique adaptative mais aussi les aberrations propres aux voies différentielles. Cette technique a entre autres été retenue pour obtenir des images à fort contraste avec l'instrument SPHERE/VLT (Beuzit et al., 2006 [21]).

2.8 Apports en astrophysique de l'imagerie par optique adaptative et coronagraphie

Outre la détection et l'imagerie des exoplanètes, l'imagerie à très haute dynamique (ITHD) par optique adaptative et coronagraphie profitera aux objets astrophysiques suivants :

- les disques circumstellaires.
- les comètes : les comètes, bien connues dans le système solaire, existent aussi autour d'autres étoiles. Elles ont été détectées dans le disque qui entoure β Pictoris. Une comète qui passerait devant le disque de son étoile produirait une diminution de l'éclat apparent de l'étoile, une sorte de transit et ce bien entendu à condition que l'observateur soit bien placé : ce transit aura une allure très différente de celui d'une exoplanète en raison de la petite taille de la comète par rapport à sa grande chevelure. Le satellite COROT devrait pouvoir détecter ces comètes, il serait aussi intéressant de les imager afin de mieux connaître leurs caractéristiques.
- les étoiles massives : il sera possible de voir plus près du centre de l'étoile et d'imager des structures plus petites et très peu lumineuses permettant dans ce cas de mieux appréhender le mécanisme de perte de masse de ces étoiles jusqu'à la limite de diffraction du télescope employé.
- les noyaux actifs de galaxies proches

2.9 Etat de l'art de l'ITHD par optique adaptative et coronagraphie

2.9.1 Projets au sol

- CIA sur le CFHT (Baudoz et al., 2000 [17]) : Le CIA a été réalisé et équipé pour tests sur le ciel sur le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT) où est installé le système d'optique adaptative PUEO et la caméra infrarouge KIR (bande K, centrée à 2 microns). Les performances en sondage proche (close-sensing) ont été vérifiées et la réjection s'est révélée être en accord avec les évaluations théoriques.
- 4QPM sur le VLT en janvier 2004 (Boccaletti et al., 2004 [25]) : un coronographe à 4 quadrants a été monté pendant 2 nuits au foyer de NACO sur le VLT. Une atténuation du pic stellaire de l'ordre de 10 a été obtenue ; cette dernière était principalement limitée par les résidus de phase atmosphériques non corrigés par l'optique adaptative.
- HiCIAO, High-Contrast Coronagraphic Imager for Adaptive Optics sur Subaru (Hodapp et al., 2007 [59]) : Il s'agit d'un imageur différentiel simultané et d'un coronographe installés au foyer Nasmyth du télescope Subaru qui est équipé d'un système d'optique adaptative. Cet instrument est dédié à la recherche de compagnons de faible intensité, de naines brunes et de planètes géantes jeunes autour d'étoiles proches par imagerie différentielle en bande H. La première lumière de cet instrument a eu lieu le 3 décembre 2007.
- Le Lyot Project (Sivaramakrishnan et al., 2007 [93]) : il s'agit actuellement du premier projet de coronographe couplé à une optique adaptative extrême à commencer à être en opération. Cet instrument est déployé au télescope de 3.6 mètres AEOS de l'Air Force (Roberts et Neyman, [88]) et ouvre de nouveaux domaines de recherche dans le paramètre de séparation de masse de faibles compagnons proches d'étoiles de magnitude supérieure à $V=7$. Il s'agit d'un coronographe de Lyot apodisé couplé à une optique adaptative permettant d'obtenir des rapports de Strehl autour de 90% dans la bande H lors des meilleures conditions de seeing et possédant un module d'imagerie différentielle ainsi qu'un mode

d'imagerie polarimétrique simultanée. Deux nouvelles techniques permettant d'effectuer de l'astrométrie relative et de la photométrie de précision sont aussi implémentées.

- SPHERE/VLT (Beuzit et al., 2006 [21]) : cet instrument de seconde génération pour le VLT, auquel toutes les études que j'ai menées dans la partie II de ma thèse sont dédiées, sera décrit en détail au chapitre 1 de cette partie.
- GPI, Gemini Planet Imager (Graham et al., 2007 [50]) : dans la lignée de SPHERE, cet instrument associe un coronographe de Lyot apodisé à une calibration simultanée à deux longueurs d'ondes.
- Extremely Large Telescope (ELT) : A plus long terme, les États Unis et l'Europe ont des projets de très grands télescopes dont le diamètre sera compris, en fonction de la faisabilité et du coût, entre 30 mètres et 100 mètres. Ils seront tous équipés de caméras destinées à détecter des planètes en imagerie. La possibilité de détecter des exo-Terres avec cette future génération de télescopes qui devraient voir le jour autour de 2020 est à l'étude. L'ELT européen ou E-ELT sera un télescope de 42 mètres équipé d'un coronographe s'appelant EPICS (Kasper et al., 2007 [63]).

2.9.2 Projets spatiaux

- JWST - MIRI (Rouan et al., 2007 [91]) : le James Webb Telescope est un télescope de 7 mètres de diamètre optimisé pour l'infrarouge. Il comprend une caméra MIRI (Mid-InfraRed Imager) équipée d'une série de coronographes (coronographes de Lyot et à quatre quadrants) adaptés à la détection de planètes dans différentes longueurs d'onde de 7 à 20 microns. Le lancement du JWST est prévu pour 2013.
- TPF-C (Ford et al., 2006 [44]) : le Terrestrial Planet Finder Coronagraph est un télescope de 3.5m x 7 m équipé d'un coronographe et destiné à détecter des planètes telluriques par lumière stellaire réfléchie. Pour l'instant, le concept de l'instrument n'est pas figé et plusieurs types de coronographes sont à l'étude.
- SPICA, SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics (Enya et al., 2007 [43]) : il s'agit d'un télescope de 3.5m qui est prévu pour être lancé vers 2015 par l'agence spatiale japonaise. Ce télescope fonctionnera dans les domaines spectraux allant du proche infrarouge à l'infrarouge lointain et jusqu'aux longueurs d'onde submillimétriques (200 microns). La région spectrale la plus basse (5 - 20 microns) sera dédiée à de l'ITHD par coronagraphie pour laquelle plusieurs concepts de coronographes sont actuellement testés en laboratoire (PIAAC et coronographe à masques binaires).
- TOPS (Guyon et al., 2007 [58]) : il s'agit d'une proposition de mission spatiale afin d'imager simultanément dans le visible (0.4-0.9 micron) des systèmes planétaires d'étoiles proches dans 16 bandes spectrales (résolution $R=20$). Ce télescope spatial de 1.2 mètre comprendra entre autres un coronographe PIAAC.

Deuxième partie

Développement d'un coronographe de Lyot apodisé pour l'instrument VLT-SPHERE

Chapitre 1

L'instrument SPHERE

1.1 Présentation de l'instrument SPHERE

SPHERE [21] est l'acronyme de Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch. Il s'agit d'un instrument de seconde génération pour équiper l'un des quatre télescopes de 8 mètres du VLTI, pour lequel l'ESO a lancé un appel d'offre fin 2002.



FIG. 1.1 – Les 4 télescopes de 8m du VLTI au Mont Paranal au Chili (<http://www.eso.org/gallery>).

Deux consortia différents ont répondu à cet appel d'offre et ont étudié la faisabilité, défini les cibles potentielles et développé un concept préliminaire d'un tel instrument. Après arbitrage par l'ESO entre les deux propositions d'instruments, un design plus précis de l'instrument a été déterminé et la phase B du projet a commencé dès mars 2006. La table 1.1 recense les organismes impliqués dans le consortium SPHERE. La première lumière de SPHERE au VLT est prévue pour fin 2010.

1.2 Objectifs astrophysiques de l'instrument SPHERE

L'objectif scientifique principal de l'instrument SPHERE est la détection et l'étude de nouvelles planètes géantes extrasolaires orbitant près de leur étoile parente par imagerie à haute résolution angulaire de leur environnement circumstellaire.

Le challenge est l'important contraste existant entre l'étoile mère et la planète qui est supérieur à 12,5 magnitudes (ou 10000 en terme de rapport de flux) et ceci à des distances angulaires très faibles (de l'ordre de quelques dizaines de mas).

Instituts	Localisation géographique
Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble (LAOG)	Grenoble, France
Max-Planck Institut für Astronomie (MPIA)	Heidelberg, Allemagne
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM)	Marseille, France
Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique	Paris, France
INAF - Osservatorio Astronomico di Padova	Padoue, Italie
Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice (LUAN)	Nice, France
ESO	Garching, Allemagne
Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)	Chatillon, France
Stichting ASTRonomisch Onderzoek in Nederland	Pays-Bas
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich, Suisse
Observatoire de Genève	Genève, Suisse
Universiteit van Amsterdam	Amsterdam, Pays-Bas

TAB. 1.1 – Laboratoires membres du consortium SPHERE.

SPHERE effectuera un survey étalé sur 250 nuits qui se concentrera sur les types de cibles astronomiques suivantes :

- les jeunes associations proches : elles offriront la plus grande possibilité de détecter des planètes de faible masse puisqu'elles auront des compagnons stellaires plus brillants et, de ce fait, le plus grand nombre de planètes par étoiles observées
- les étoiles ayant des planètes connues, et spécifiquement celles qui présentent des résidus de long terme dans leurs courbes de vélocité radiale, indiquant la présence possible d'une autre planète
- les étoiles les plus proches : observer ces cibles sondera les orbites les plus petites et offrira l'opportunité de détecter des planètes directement par leur lumière réfléchie
- les étoiles âgées de 100 Ma à 1Ga : les planètes seront toujours plus lumineuses par comparaison avec les planètes du système solaire, donc la masse limite sera plus faible comparée aux systèmes âgés

Par ailleurs, il est évident qu'avec un instrument ayant un tel objectif principal, d'autres domaines de recherche pourront bénéficier des performances d'imagerie à fort contraste de SPHERE : les disques proto-planétaires, les naines brunes, les étoiles massives évoluées et plus marginalement le système solaire et la science extragalactique. Ces domaines permettront d'enrichir fortement l'impact scientifique de l'instrument.

1.3 Description du design de l'instrument SPHERE

L'instrument est composé de quatre sous-systèmes majeurs, comme on peut le voir sur la figure 1.2 : le "Common Path" qui comprend un système d'optique adaptative extrême ainsi que des coronographes visible et proche-infrarouge et trois instruments de science nommés respectivement IRDIS, IFS et ZIMPOL. Ces quatre sous-systèmes sont décrits dans les paragraphes suivants.

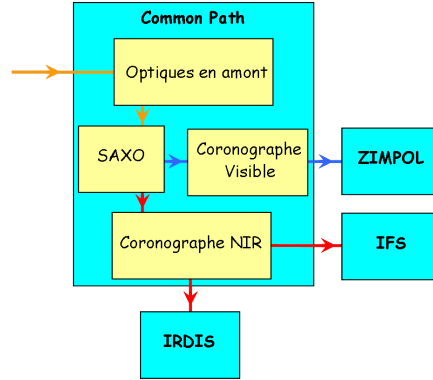


FIG. 1.2 – Concept global de l'instrument SPHERE montrant les quatre sous-systèmes de l'instrument : Common Path, IRDIS, IFS et ZIMPOL [21]. Les faisceaux optiques sont représentés en rouge pour le proche infrarouge, bleu pour le visible et orange pour le common path.

1.3.1 Le "Common Path"

Les optiques du "Common Path" transmettent la lumière du télescope vers l'analyseur de front d'onde de l'optique adaptative et vers les trois instruments de science via les éléments correcteurs du système d'optique adaptative et via les coronographes. La figure 1.3 montre l'implémentation de SPHERE au foyer Nasmyth d'un VLT.

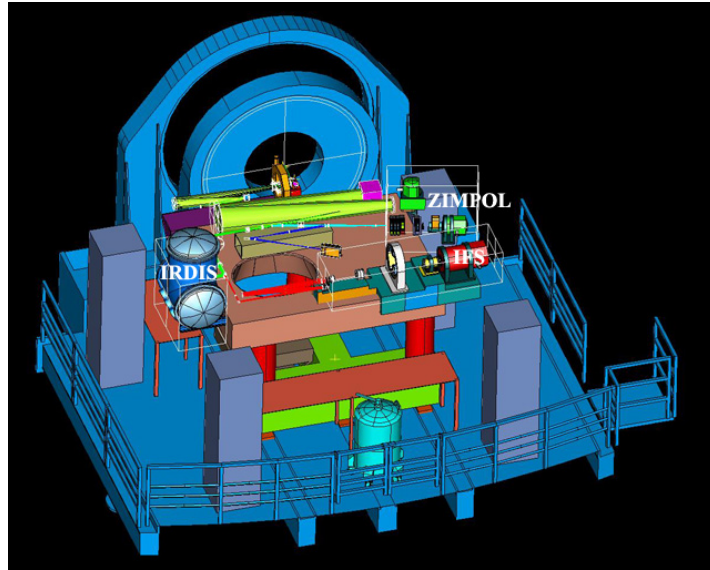


FIG. 1.3 – Implémentation de l'instrument SPHERE sur la plateforme d'un VLT [21].

Le système d'optique adaptative extrême SAXO

Le design du système d'optique adaptative de SPHERE nommé SAXO (SPHERE Adaptive optics for eXoplanet Observation), résulte d'un compromis prenant en compte à la fois le design optique, les aspects technologiques, le coût et le risque. La solution retenue utilise un miroir déformable de 180 mm de diamètre possédant 41x41 actuateurs ainsi qu'un miroir correcteur de tip-tilt à 2 axes. L'analyseur de front d'onde est du type Shack-Hartmann utilisant 40x40 sous-pupilles.

De plus, pour tout instrument à fort contraste, il est essentiel d'assurer la stabilité de l'image et de la pupille. Ainsi, les mouvements d'image différentiels dus aux effets thermo-mécaniques et au mécanisme du correcteur de dispersion atmosphérique ainsi que la dérive pupillaire sont mesurés et corrigés en temps réel. Les aberrations non communes sont aussi mesurées et compensées.

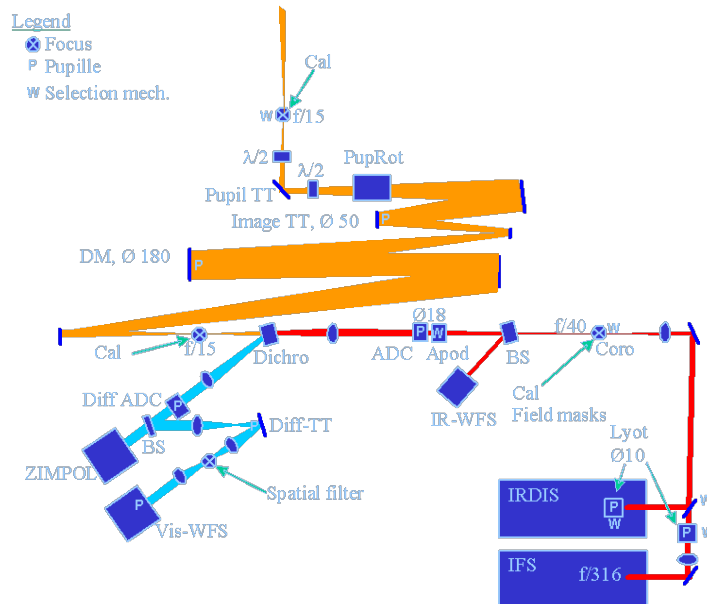


FIG. 1.4 – Design optique de l'instrument SPHERE [21].

Les coronographes

Des coronographes performants sont nécessaires en vue d'atteindre les objectifs scientifiques de SPHERE. Leur action sera double : d'une part, réduire l'intensité du pic stellaire d'un facteur égal au moins à 100 et, d'autre part, éliminer les résidus de diffractions dus aux bords de pupille. L'instrument comprendra plusieurs coronographes interchangeables : un coronographe à 4 quadrants achromatique, un coronographe de Lyot classique ainsi qu'un coronographe de Lyot apodisé.

1.3.2 IRDIS, le spectrographe et l'imageur infrarouge à deux longueurs d'onde

L'instrument IRDIS, Infra-Red Dual-beam Imager and Spectrograph, constitue le module de science principal de l'instrument SPHERE. Le mode de fonctionnement principal d'IRDIS est l'imagerie à deux bandes de longueurs d'onde qui fournit des images dans deux canaux spectraux voisins avec des aberrations différentielles minimisées (< 10 nm rms). IRDIS couvre le domaine spectral allant de 950 nm à 2320 nm. En complément, un module de spectroscopie à large fente (de pouvoir résolution de 50 et 500) ainsi qu'une option d'imagerie polarimétrique différentielle sont inclus. La séparation des deux faisceaux est effectuée en utilisant une séparatrice couplée à un miroir, produisant ainsi deux faisceaux parallèles, chaque faisceau possédant son propre doublet de caméra et de filtre spectral.

1.3.3 IFS, le spectrographe infrarouge à champ intégral

IFS, Infra-red Integral Field Spectrograph, est un spectrographe à champ intégral. Un spectrographe à champ intégral est largement reconnu comme étant un module de science potentiellement très utile pour un instrument chercheur de planète. En effet, l'IFS peut, d'une part, être construit virtuellement avec des aberrations différentielles nulles et d'autre part, des canaux spectraux multiples permettent une meilleure correction de la chromaticité des speckles. L'IFS travaillera en bandes spectrales Y et J et sera un module complémentaire d'IRDIS.

1.3.4 ZIMPOL, l'imageur différentiel dans le visible

ZIMPOL, Zurich Imaging Polarimeter, est un imageur différentiel polarimétrique fonctionnant dans le visible, au moins de 600nm à 900nm. Le principe de l'instrument est basé sur de la modulation rapide en utilisant un retardeur ferro-électrique puis de la démodulation du signal polarisé en utilisant un capteur CCD modifié (Joos, 2007 [60]). Les avantages de cette technique sont la détection simultanée de deux polarisations perpendiculaires (la modulation est plus rapide que les variations du seeing) et l'enregistrement des deux images sur le même pixel. En addition à l'imagerie polarimétrique, ZIMPOL offre la possibilité de faire de l'imagerie à haute résolution dans le visible en utilisant un ensemble de filtres à bandes larges et étroites.

1.4 Spécifications de base de l'instrument SPHERE et modes d'observation

Les spécifications de base dérivent de l'analyse des besoins scientifiques et ce compte-tenu du design de l'instrument. Les spécifications clés sont les suivantes :

- fort contraste pour atteindre des planètes géantes dont l'écart de magnitude par rapport à leur étoile hôte est de l'ordre de 14 à 16,
- accès à de très faibles séparations angulaires, de 0.1" à 0.3" de l'étoile hôte,
- sensibilité et performance optimales pour des cibles allant jusqu'à la magnitude visible de 10 de manière à avoir un volume d'échantillon cohérent avec les objectifs (400 cibles au total dont 100 de priorité haute),
- sensibilité à des compagnons faibles jusqu'à la magnitude 24 en bande H,
- accès à un domaine spectral étendu à faible résolution (30 environ) pour la caractérisation des objets détectés,
- sensibilité aux sources étendues jusqu'à la 17^{ème} magnitude par arcseconde carrée à moins de 0.2" de l'étoile hôte.

La table 1.2 recense les spécifications de SPHERE par module. Afin de profiter au maximum des capacités instrumentales de SPHERE, trois modes d'observations ont été définis :

- le mode survey en infrarouge proche : il s'agit du mode d'observation principal; il sera utilisé pour 80% du temps d'observation. Il combine de l'imagerie différentielle en bande H avec de la spectroscopie.
- le mode de caractérisation en proche infrarouge.
- le mode de recherche et de caractérisation dans le visible.

Spécification requise	IRDIS	IFS	ZIMPOL
Sortie optique	40% (objectif 45%) pour chaque faisceau	60% (objectif 70%)	25% (objectif 40%)
Couverture spectrale	0.95 - 2.320 μm	0.95 - 1.35 μm	600 - 900 nm
Résolution spectrale	DBI : $R \sim 20\text{-}30$ LS : $R \sim 50$ (Y-K), 500 (0.95 - 1.8 μm)	$R \sim 30$	
Champ de vue	> 11" carré	> 1.35" carré	> 3" carré
Echantillonnage spatial	12.25 mas	12.25 mas	<7.8 mas
Contraste (5σ)	à 0.1" : $5 \cdot 10^{-5}$ à 0.5" : $5 \cdot 10^{-6}$	à 0.5" : $< 10^{-6}$	à 1" : 10^{-8} en 4h pour 1 planète polarisée à 30%
Modes d'observation	Imagerie Imagerie différentielle à 2 longueurs d'onde (DBI) Imagerie polarimétrique différentielle (DPI) Spectroscopie à large fente (LS)	IFS Spectrographe à champ intégral	Imagerie dans le visible Imagerie polarimétrique différentielle

TAB. 1.2 – Spécifications de base de l'instrument SPHERE.

1.5 Contribution du LUAN au projet SPHERE

1.5.1 Contexte et chronologie générale

Durant la phase A de SPHERE, des scientifiques du laboratoire ont été membres du "Science Group", de l'"Instrument Definition Group" et du "Simulation Group" du consortium. Le "Science Group" définit les objectifs scientifiques de l'instrument, l'"Instrument Definition Group" s'occupe du concept opto-mécanique de l'instrument et le "Simulation Group" des simulations numériques des différents coronographes, de la modélisation des effets de la turbulence atmosphérique et des post-traitements à appliquer à l'image coronographiée. Le LUAN s'est particulièrement intéressé aux coronographes envisagés pour l'instrument : d'une part, dans une phase de simulation des performances coronographiques et d'autre part, dans la réalisation et la validation expérimentale de deux coronographes, le coronographe de Roddier & Roddier apodisé et le coronographe de Lyot apodisé. Après la revue par l'ESO en avril 2005 des deux études de phase A concurrentes proposées par chaque consortium, les composants de l'instrument ont été clairement définis, aboutissant notamment à la création d'un instrument et d'un consortium unique issu de la fusion des deux études. La post-phase A a permis la validation de l'intérêt scientifique des concepts retenus et la poursuite de l'étude de faisabilité. Le "kick-off meeting" de la phase B de SPHERE a eu lieu en mars 2006. Le LUAN intervient directement dans les groupes de travail Coronographes, Réduction de données, Science et Simulations.

1.5.2 Contexte et chronologie concernant le développement du coronographe de Lyot apodisé

Dans ce paragraphe, je précise la chronologie relative plus précisément à mes travaux de thèse, à savoir l'étude et le développement d'un coronographe de Lyot apodisé (ALC).

Lors de l'appel d'offre lancé fin 2002 par l'ESO pour SPHERE, l'ALC constituait un système coronographique nouveau dont le principe venait d'être énoncé par Claude Aime (Aime et al., 2002 [8]).

L'étude de phase A de SPHERE a conduit à tester la faisabilité d'un tel coronographe et notamment de son constituant novateur, l'apodiseur, et à réaliser une validation expérimentale du concept. Pour plus de commodité et de simplicité, il a été décidé d'effectuer ces tests dans le visible. Un premier prototype d'apodiseur a donc été acheté durant la phase A du projet. Cet apodiseur a été fabriqué par dépôt d'Aluminium sur un masque tournant par la société INO (Canada) et son profil en transmission a été optimisé pour un masque coronographique de Lyot de diamètre angulaire $3\lambda/D$. Trois échantillons d'apodiseurs ont été fabriqués par INO durant le premier semestre 2004. Le premier est un échantillon test sur un substrat d'épaisseur supérieure à 5 mm. Pour tous les échantillons, c'est une couche d'argent non protégée qui a été déposée ; ceci signifie que la transmission peut se dégrader en fonction des conditions de l'air ambiant. INO avait mentionné que le design du masque rotatif n'était pas correct pour les deux premiers échantillons. Le troisième masque rotatif a été conçu de manière à corriger le défaut de transmission mais un défaut mécanique durant le montage du masque rotatif n'a pu corriger le défaut à l'emplacement souhaité. Les trois échantillons se sont donc trouvés être largement hors spécifications et l'étude des performances de l'ALC n'a pu donc aboutir.

Lors de la post-phase A qui coïncide avec mon arrivée en thèse, il a été décidé de commander un nouvel apodiseur fonctionnant toujours dans le domaine de longueur d'onde visible et ayant le même profil en transmission que le précédent prototype. Cette commande a été effectuée après définition d'un tolérancement plus précis et étude des procédés possibles de fabrication auprès de différents fournisseurs. C'est ainsi qu'un apodiseur fabriqué par la société Reynard Corp. (USA) a été acheté en novembre 2005 par le LUAN et l'Observatoire de Haute-Provence sur fonds propres. Cet apodiseur a été réalisé par dépôt d'inconel et a été testé au LUAN sur le banc ITHD du laboratoire. Les résultats de ces tests sont présentés au chapitre 4.

Des simulations réalisées par Marcel Carbillet et Philippe Bendjoya en juin 2006 ont montré que le diamètre optimal du masque coronographique du Lyot aboutissant à de meilleures performances de l'instrument SPHERE n'était pas $3\lambda/D$ mais $4\lambda/D$. Ce changement de diamètre du masque coronographique a engendré un changement du profil de transmission optimal de l'apodiseur.

L'achat d'un nouvel apodiseur s'est donc avéré être nécessaire. Cet apodiseur a été optimisé de manière à satisfaire aux spécifications de l'instrument SPHERE en ce qui concerne le diamètre de la pupille et le fonctionnement dans le domaine spectral du proche infrarouge (les bandes Y, J et H). Les études numériques relatives à ce deuxième apodiseur sont présentées dans le chapitre 5. Les tests de l'ALC Infrarouge ont été effectués sur le banc Infrarouge du LESIA à l'observatoire de Paris-Meudon. Les premiers résultats des tests de l'ALC $4\lambda/D$ sont présentés dans le chapitre 6.

Chapitre 2

Présentation détaillée du coronographe de Lyot apodisé (ALC)

Dans ce chapitre, je présente en détail tout ce qui a trait au coronographe de Lyot apodisé qui appartient à la catégorie des coronographes d'amplitude. Ceci concerne un rapide historique, le formalisme dans le cas idéal puis dans celui de l'instrument SPHERE/VLT qui nous intéresse ainsi que les procédés d'optimisation numérique et de fabrication de ces composants.

2.1 Introduction : les coronographes d'amplitude

2.1.1 Historique

Les coronographes d'amplitude sont des variantes du coronographe de Lyot dont le principe a été exposé dans la partie I. Une des premières variations a été de lisser la transmission du masque coronographique par une apodisation gaussienne afin d'optimiser le filtrage réalisé par le Lyot stop dans le plan pupille coronographique conjugué (Watson et al., 1991 [106]). On retrouve la même philosophie avec les coronographes "band-limited" et "notch-filter" qui sont basés sur une optimisation du filtrage produit par le masque coronographique (Kuchner et al., 2002 [64], Crepp et al., 2006, [38]). Un de leurs inconvénients est d'être difficile à réaliser car leur amplitude varie de façon continue. En outre, le masque atténue de manière non négligeable le compagnon, même loin de l'étoile. Une autre solution est le coronographe "shaped-pupil" qui ne comporte pas de masque coronographique de Lyot et dont le principe repose uniquement sur une apodisation de la pupille d'entrée. Il a été proposé dès 1964 par Jacquinot et des dérivés ont été présentés récemment par Nisenson et Papaliolios, 2001 [82]), Kasdin et al. (2003 [61] et 2005 [62]), Debes et Ge (2004 [39]).

2.1.2 Premières applications stellaires

Des coronographes de Lyot sont utilisés depuis longtemps pour surveiller l'activité solaire dans son environnement direct comme par exemple à l'observatoire du Pic du Midi ou dans l'espace avec le satellite SOHO et son coronographe LASCO. Ce n'est que dans les années 80 que des coronographes de Lyot stellaires dédiés à l'étude d'objets autres que la couronne solaire ont vu le jour. Ainsi, il a été possible de détecter un disque autour de β Pictoris (Smith et Terrile, 1984 [95]). Nakajima et al. (Nakajima, 1995 [79]) ont découvert la naine brune Gl 229 B grâce à un coronographe installé au Palomar. Plus récemment, c'est le coronographe installé au Subaru qui a permis la détection de l'exoplanète γ Cep b (Neuhäuser et al., 2007 [81]) avec la caméra CIAO.

2.2 Présentation de l'ALC optimisé pour l'instrument VLT-SPHERE

La figure 2.1 présente le schéma de principe du coronographe de Lyot apodisé optimisé pour l'instrument VLT-SPHERE.

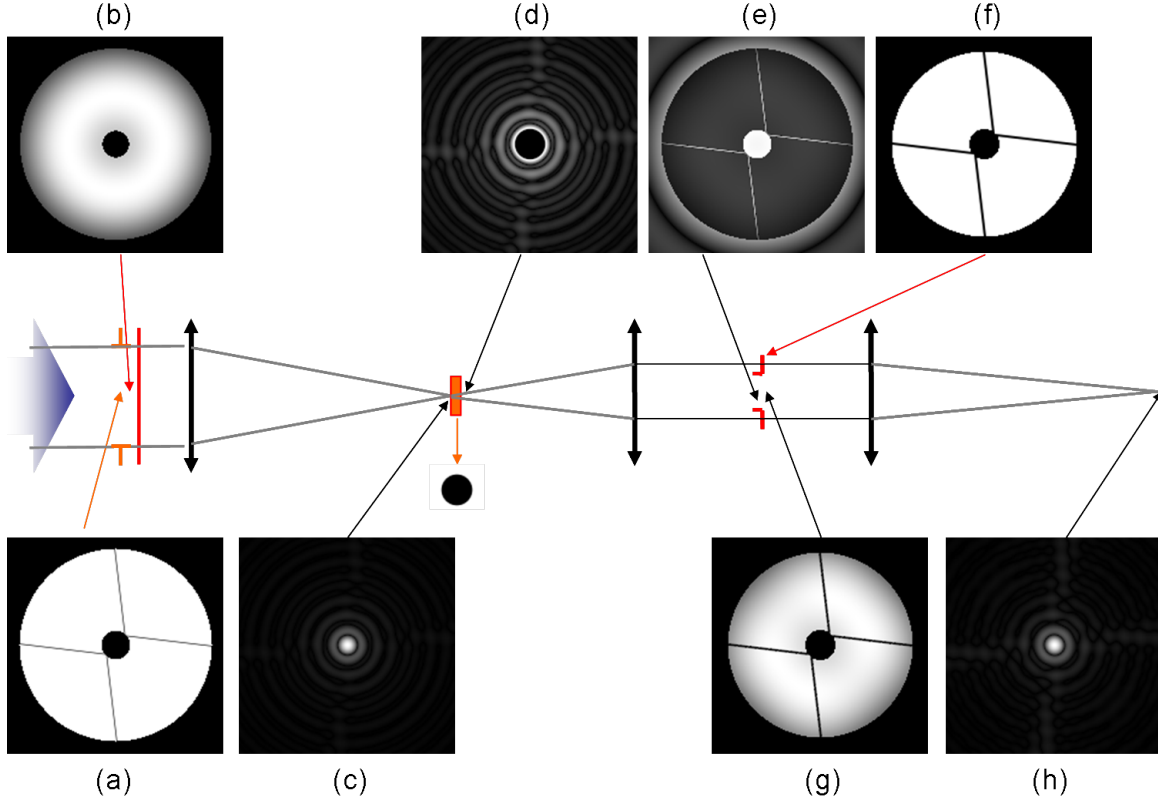


FIG. 2.1 – Principe du coronographe de Lyot apodisé avec représentation de ces composants principaux (flèches orange/rouge) et des images dans les différents plans (flèches noires) dans le cas de l'ALC optimisé pour l'instrument VLT-SPHERE : (a) pupille d'entrée du VLT, (b) apodiseur, (c) PSF au foyer du télescope, (d) PSF quand le masque coronagraphique est présent, (e) image de la pupille avant l'introduction du Lyot stop, (f) diaphragme de Lyot, (g) image de la pupille avec le diaphragme de Lyot, (h) PSF coronagraphiée finale.

Les flèches oranges et rouges indiquent les différents composants de l'ALC tandis que les flèches noires illustrent les distributions d'intensité dans les différents plans conjugués (plan pupille ou plan image).

Les caractéristiques des trois composants majeurs de l'ALC que sont l'apodiseur, le masque coronagraphique et le Lyot stop ont été optimisées afin d'obtenir les meilleures performances possibles par rapport aux objectifs astrophysiques de l'instrument. L'optimisation des composants du coronographe sera décrite dans les sections suivantes : les méthodes générales sont exposées dans ce chapitre et le chapitre 5 est dédié à leur application pratique pour dimensionner l'ALC de l'instrument SPHERE.

2.3 Formalisme dans le cas idéal d'une pupille d'entrée ronde

Le formalisme du coronographe de Lyot apodisé a été décrit en détail par R. Soummer, C. Aime et A. Ferrarri (Soummer et al., 2003 [97]). J'en rappelle les grandes lignes. La figure 2.2 décrit les notations utilisées pour clarifier le rôle de chacun des quatre plans successifs considérés dans le montage de l'ALC.

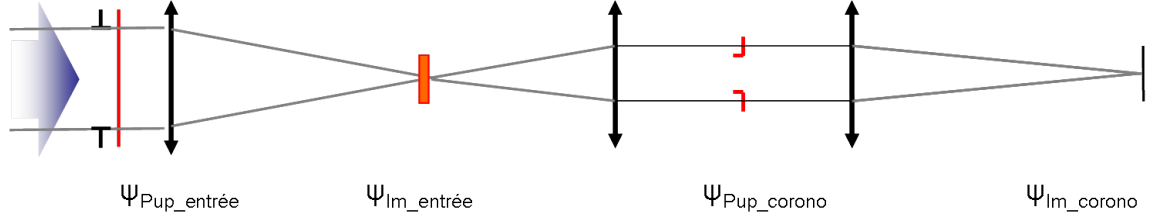


FIG. 2.2 – Schéma de principe du coronographe de Lyot apodisé montrant les différentes notations utilisées dans le formalisme.

On adopte dans un premier temps l'hypothèse que l'ouverture du télescope ne présente pas d'obstruction centrale et correspond à une pupille circulaire de diamètre D . On note r la coordonnée radiale de position latérale des éléments au niveau des différents plans à partir de l'axe de propagation.

2.3.1 Expression des amplitudes complexes de l'onde lumineuse dans les différents plans

Dans le plan pupille d'entrée, l'amplitude complexe de l'onde lumineuse est proportionnelle à :

$$\Psi_{\text{Pup_entrée}}(r) = \Pi\left(\frac{r}{D}\right) \Phi(r) \quad (2.1)$$

où Π est la fonction de transmission du télescope valant 1 à l'intérieur de l'ouverture du télescope et 0 à l'extérieur et Φ représente la fonction d'apodisation réelle et positive avec $\Phi(r) \leq 1$. Notons que l'erreur de phase introduite par un apodiseur non parfait est négligée.

La propagation de l'onde lumineuse du plan pupille d'entrée vers le plan focal suivant s'écrit par une transformée de Fourier qui sera représentée par le symbole $\hat{\cdot}$. La transformée de Fourier d'une fonction radiale est une fonction radiale dont la coupe radiale s'exprime en utilisant la transformée de Hankel :

$$\hat{\Psi}_{\text{Pup_entrée}}(r) = \int_0^\infty 2\pi\rho \Psi_{\text{Pup_entrée}}(\rho) J_0(2\pi\rho r) d\rho$$

Dans le plan image d'entrée, le masque coronographique est un disque de diamètre d proportionnel à la figure de diffraction produite par l'ouverture. A la longueur d'onde de travail λ , le diamètre du masque vaut :

$$d = a \lambda f$$

a est un paramètre qui détermine le diamètre du masque coronographique en unités de $1/D$ et f est la focale du télescope.

L'amplitude de l'onde après le masque coronographique s'écrit :

$$\Psi_{\text{Im entrée}}(r) = \frac{1}{i\lambda f} \hat{\Psi}_{\text{Pup entrée}}\left(\frac{r}{\lambda f}\right) \times \left[1 - \Pi\left(\frac{r}{d}\right) \right] \quad (2.2)$$

Dans le plan pupille coronographique et avant l'insertion du Lyot stop, l'expression de l'amplitude complexe de l'onde $\Psi_{\text{Pup corono}}^-(r)$ est (on suppose que les focales des différentes optiques sont identiques) :

$$\Psi_{\text{Pup corono}}^-(r) = \Psi_{\text{Pup entrée}}(r) - \Psi_{\text{Pup entrée}}(r) * \frac{aJ_1(\pi ar)}{2r} \quad (2.3)$$

où $*$ représente le produit de convolution.

On introduit ensuite le Lyot stop afin de supprimer la lumière diffractée à l'extérieur de la pupille ; on le considère égal à la forme de la pupille d'entrée. L'expression de l'amplitude complexe de l'onde $\Psi_{\text{Pup corono}}^+(r)$ après insertion du Lyot stop est :

$$\Psi_{\text{Pup corono}}^+(r) = \Psi_{\text{Pup corono}}^-(r) \times \Pi\left(\frac{r}{D}\right) \quad (2.4)$$

Il est intéressant de noter que l'amplitude dans le plan pupille coronographique est une simple différence entre l'amplitude au niveau de la pupille d'entrée et une autre fonction multipliée par la pupille d'entrée.

Finalement, l'amplitude coronographique au niveau du détecteur est :

$$\Psi_{\text{Im corono}}(r) \propto \hat{\Psi}_{\text{Pup corono}}^+(r) = \frac{1}{i\lambda f} \left[\hat{\Psi}_{\text{Pup entrée}}(r) - \hat{\Psi}_{\text{Pup entrée}}(r) \Pi\left(\frac{r}{d}\right) \right] * \frac{J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda f}} \quad (2.5)$$

2.3.2 Recherche de la fonction d'apodisation optimale

L'extinction coronographique est totale dans le plan pupille coronographique si l'on a :

$$\Psi_{\text{Pup corono}} = 0 \text{ soit } \Psi_{\text{Pup entrée}}(r) = \Psi_{\text{Pup entrée}}(r) * \frac{aJ_1(\pi ar)}{2r}$$

Ceci revient à dire que la solution optimale est obtenue si l'amplitude de l'onde diffractée par le masque est égale à l'amplitude initiale de la pupille d'entrée. En langage plus mathématique, $\Phi(r)$ doit être fonction propre de l'expression de convolution de l'équation 2.4. En terme "coronographique", la meilleure solution est l'apodisation de la pupille qui produit la PSF dont l'énergie est la plus concentrée derrière un masque focal coronographique donné.

La solution analytique de fonction d'apodisation répondant à cette condition est donnée par les fonctions prolates circulaires sphéroïdales développées par Slepian et Pollak (Slepian et Pollak, 1961 [94]). Une propriété remarquable des fonctions prolates est que la transformée de Fourier d'une fonction prolata tronquée est elle-même une fonction prolata. Ceci offre la possibilité de réaliser un coronographe de Lyot apodisé à plusieurs étages (Aime et al., 2002 [8]).

2.4 Etude théorique dans le cas réel du VLT

Les résultats présentés dans la section précédente ne sont valables que dans le cas où la pupille d'entrée est circulaire. Hélas, ceci n'est pas le cas des projets de coronographes réalisés au foyer des télescopes au sol actuels. En effet, ces télescopes présentent une géométrie de pupille particulière avec au moins la présence d'une obstruction centrale. Dans ce cas, et même en l'absence d'erreurs de front d'onde, l'apodisation par les fonctions prolates ne peut être appliquée directement aux pupilles à obstruction centrale (ainsi qu'à un large domaine spectral) sans une perte considérable d'efficacité.

Soummer (2005 [99]) a étudié en détail l'optimisation d'un coronographe de Lyot apodisé dans le cas de télescopes présentant une obstruction centrale. Je vais rappeler les principaux résultats :

1. Dans le cas d'un télescope à ouverture circulaire l'expression de $\Psi_{Pup\ coron}$ peut être simplifiée en utilisant un noyau $K_0(\xi, r)$ qui dépend de la taille du masque focal. Pour une ouverture présentant une obstruction centrale, l'équation 2.3 peut se généraliser de la manière suivante :

$$\Psi_{Pup\ coron}(r) = \Psi_{Pup\ entrée}(r) - \epsilon(2\pi)^2 \int_{D_2/2}^{D_1/2} \xi \Phi(\xi) K_0(\xi, r) d\xi \quad (2.6)$$

où D_1 correspond au diamètre du miroir primaire et D_2 correspond au diamètre du miroir secondaire.

2. Les apodiseurs peuvent avoir une forme très différente suivant la taille de l'obstruction centrale. Ceci affecte de manière importante la valeur du coefficient de transmission et les performances du coronographe. Une petite obstruction produit un apodiseur dont la forme est asymétrique tandis qu'une obstruction plus large produit un apodiseur plus symétrique.
3. Pour une forme de pupille donnée, la forme de l'apodisation dépend de la taille du masque coronographique. Elle dépend du rapport entre le diamètre du masque coronographique et le diamètre de l'obstruction centrale.

Pour illustrer ce qui vient d'être énoncé aux points 2 et 3, la figure 2.3 montre l'évolution de la transmission de l'apodiseur en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique et pour différents rapports d'obstruction centrale (Martinez et al., 2007 [74]).

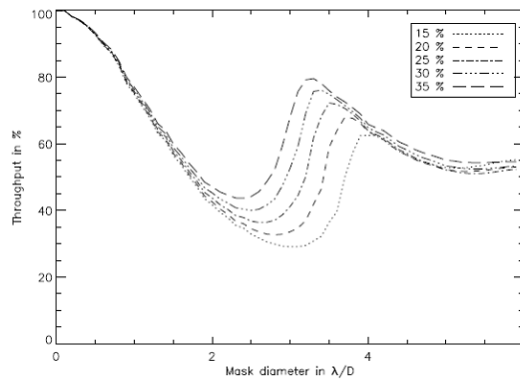


FIG. 2.3 – Transmission de l'apodiseur en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique pour différents taux d'obstruction centrale (Martinez et al., 2007 [74]).

Il apparaît de plus sur cette figure que la transmission de l'apodiseur n'évolue pas linéairement avec la taille du masque coronographique. Il n'est donc pas trivial de déterminer la meilleure combinaison apodiseur/masque coronographique.

4. Les solutions des prolates généralisées sont monochromatiques. Or, l'ALC est sensible à la chromaticité géométrique de la PSF (Soummer et al., 2003 [97]). Modifier la longueur d'onde revient à modifier la taille du masque. Les valeurs des performances coronographiques n'étant pas symétriques autour de la valeur optimale, il est nécessaire d'optimiser la taille du masque dans un large domaine de longueurs d'ondes souhaité.

2.5 Optimisation des composants de l'ALC

Calculs des profils d'apodisation :

Le calcul de l'apodisation optimale est un processus mathématique complexe qui peut être réalisé numériquement. Les profils optimaux d'apodisation sont calculés numériquement à partir de l'algorithme itératif de Gerchberg-Saxton (Gerchberg [47]), précédemment utilisé par Guyon et Roddier (Guyon et Roddier, 2000 [55]) pour déterminer la meilleure fonction d'apodisation pour le coronographe de Roddier et Roddier.

Le principe de cet algorithme est illustré dans la figure 2.4.

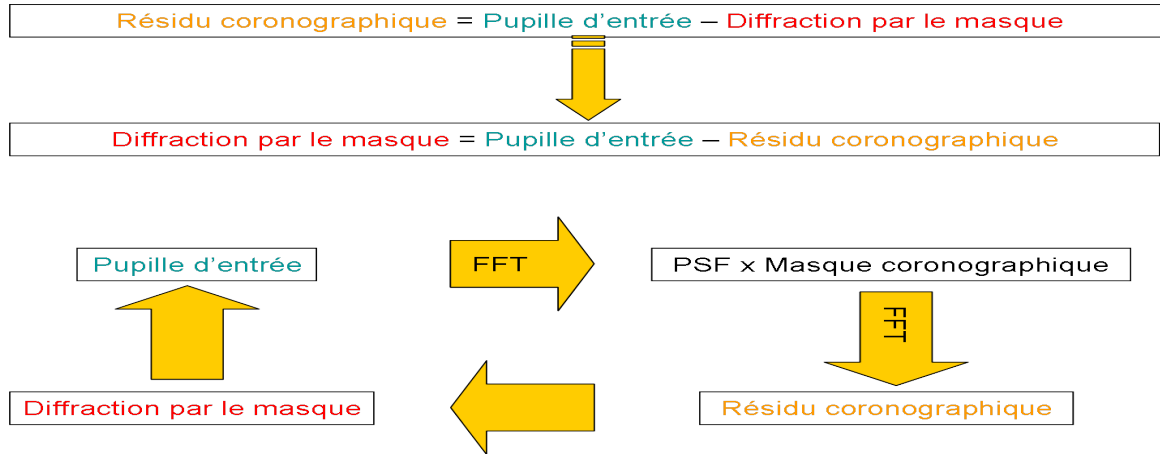


FIG. 2.4 – Principe de l'algorithme de minimisation de la fonction d'apodisation.

L'apodiseur choisi est celui entraînant une valeur du résidu coronographique minimale.

La figure 2.5 montre un exemple d'apodiseur obtenu suivant cet algorithme, il s'agit de l'apodiseur de l'ALC de SPHERE optimisé pour un masque coronographique à $4\lambda/D$.

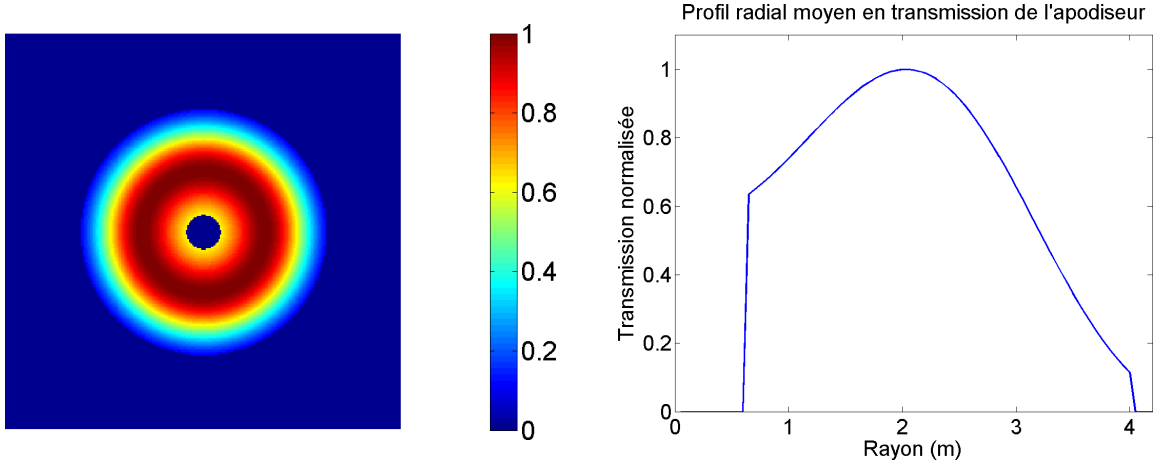


FIG. 2.5 – Exemple de forme d'apodiseur obtenue pour la géométrie de la pupille du VLT et pour un masque coronographique de diamètre angulaire $4\lambda/D$. La valeur minimale de la transmission radiale est 11.52% au niveau des bords et la valeur de la transmission globale de l'apodiseur est élevée et vaut 60.71%.

Nécessité de définir des critères d'optimisation des composants de l'ALC :

Dans le cas d'un coronographe de Lyot classique, plus le diamètre du masque coronographique est grand et meilleur est le contraste résultant. Or, dans le cas d'un coronographe de Lyot apodisé, la transmission d'un objet hors-axe similaire à un point source n'est pas linéaire : de ce fait, il faut aboutir à un compromis entre contraste et transmission du coronographe. Un critère est donc nécessaire pour optimiser les composants du coronographe.

Optimisation de la taille du masque coronographique et de l'apodiseur :

La dimension correcte du masque conditionne la performance du coronographe. Le problème principal est d'équilibrer les flux pour obtenir l'annulation maximale de l'énergie lumineuse dans la pupille coronographique : pour se faire on peut agir sur la transmission de l'apodiseur. La valeur optimale du diamètre du masque coronographique s'obtient en traçant l'évolution d'un critère en fonction du diamètre du masque. Comme critère, on peut utiliser par exemple un critère basé sur le contraste dans l'image coronographique (Martinez et al., 2007 [74]) ou le critère de maximisation de la transmission de coronographe.

Optimisation de la taille du Lyot Stop :

On peut par exemple tracer l'évolution de la réjection totale du coronographe ou du contraste à une distance au centre donnée en fonction du coefficient de transmission du Lyot stop. En outre, la taille du Lyot stop sera déterminée de manière à réduire la dégradation des performances coronographiques engendrée par les défauts de phase introduits par l'apodiseur.

2.6 Avantages et inconvénients de l'ALC

Les inconvénients de l'ALC sont :

- **Sensibilité aux variations d'amplitude** : celles-ci sont dues à l'obstruction centrale, aux araignées et à la rupture pupillaire (ou pupil shear). La rupture pupillaire correspond au désalignement latéral du Lyot stop par rapport à la pupille du télescope ; elle a été identifiée comme étant un problème majeur pour l'instrument SPHERE (Beuzit et al., 2006 [21]) : ainsi un miroir tip-tilt dédié a été introduit dans l'instrument afin de garantir l'alignement.
- **Sensibilité aux défauts de phase**
- **Chromaticité** : chromaticité géométrique du profil d'apodisation, de la transmission de l'apodiseur et des défauts de phase introduits par ce dernier.

Inversement, les avantages de l'ALC sont :

- **Sensibilité moindre aux pupilles à obstruction centrale** que les coronographes à masque de phase
- Possibilité d'obtenir un **faible angle minimal de détection** ainsi qu'une transmission importante si l'on optimise correctement les composants de l'ALC
- **Simplicité et sensibilité plus faible aux erreurs** par comparaison aux autres techniques peu sensibles aux obstructions centrales (Soummer et al., 2003 [98], Gay et Rabbia, 1996 [46]).

2.7 Etat de l'art des techniques de fabrication d'apodiseur

Les apodiseurs sont fréquemment utilisés depuis plus de vingt ans en optique des lasers afin de mettre en forme les faisceaux lasers initialement gaussiens. En effet, certaines applications industrielles nécessitent des faisceaux lasers de formes particulières, rondes ou carrées par exemple, avec des répartitions d'intensité uniformes. Dans le cas qui nous intéresse, c'est l'effet inverse qui est recherché puisque l'on veut transformer une répartition d'intensité uniforme en une répartition apodisée c'est-à-dire variable du centre au bord de la pupille et ce, sans modifier la phase de l'onde lumineuse. Par ailleurs, les formes d'apodisation ainsi que les tolérances sont totalement différentes et plus contraignantes en imagerie à très haute dynamique astronomique qu'en optique des lasers. Actuellement, le défi principal est de pouvoir fabriquer un apodiseur qui soit le plus conforme possible aux spécifications (voir 2.5) et qui introduise dans la chaîne coronographique le moins de déformation de front d'onde possible.

La technique la plus courante pour fabriquer un tel composant est de déposer un film métallique sur un substrat transparent. Le métal est évaporé dans une cloche à vide et adhère ainsi au substrat. En même temps, un masque tournant rotatif contraint l'épaisseur finale de métal déposé, ce masque a bien sûr la forme du profil en transmission souhaité. Il faut noter que, puisque le profil en transmission peut être fortement non-linéaire, la technique de fabrication doit être parfaitement maîtrisée. C'est celle-ci qui a été utilisée pour les deux apodiseurs que j'ai été amenée à utiliser durant ma thèse dans le cadre du projet SPHERE/VLT et dont les caractérisations seront présentées aux chapitres 4 et 6.

En outre, d'autres techniques de fabrication d'apodiseur sont aussi réalisées et étudiées par d'autres équipes internationales :

- Implantation ionique (société Ion Beam Services, France) : j'avais envisagé ce procédé de fabrication ; hélas les simulations numériques ont montré que l'apodisation par palliers réinjecte de la lumière dans le plan pupille coronographié entraînant de ce fait une baisse des performances coronographiques.
- Utilisation du HEBSTM glass commercialisé par la société américaine Canyon Materials (Soummer et al., 2006 [100]), Venet et al., 2006 [105]) : il s'agit d'un verre sensible aux rayons à haute énergie qui se comporte de manière similaire à les pellicules photographiques. La variation du dosage du faisceau d'électrons change la densité optique du matériau et permet donc d'obtenir un apodiseur ayant la transmission souhaitée.
- Réalisation d'apodiseur binaires à points (Soummer et al., communication privée).
- Réalisation d'apodisations interférométriques en utilisant un interféromètre de Mach-Zehnder (Aime, 2005 [10]) : les récents tests en laboratoire sont très prometteurs (Carlotti et al., 2007 [33]). Il reste juste à savoir si ce type de système pourra être suffisamment compact et stable mécaniquement pour pouvoir être implanté dans un futur instrument d'ITHD sur un grand télescope.

Chapitre 3

Simulation des propriétés de chromatisme des apodiseurs optiques

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, j'étudie par simulation numérique le chromatisme des propriétés optiques d'un apodiseur fabriqué par dépôt métallique d'un alliage d'Inconel sur un substrat de verre, processus suivant lesquels les deux apodiseurs que j'ai testés en laboratoire ont été fabriqués (l'Inconel pour réaliser la fabrication des apodiseurs a été introduit par Jean-Baptiste Daban).

Après avoir déterminé l'épaisseur d'inconel à déposer pour obtenir le profil de transmission désiré, il sera possible d'en déduire les caractéristiques suivantes :

- le coefficient de transmission de l'apodiseur sur toute la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement,
- la réflectivité engendrée par l'apodiseur,
- les déphasages introduits en réflexion et en transmission par l'apodiseur.

3.2 Propriétés optiques de l'Inconel et du substrat

Evolution des propriétés optiques de l'Inconel

Les propriétés optiques des matériaux (transmission, absorption, réflexion, polarisation) varient considérablement d'un matériau à l'autre, ainsi qu'avec la longueur d'onde considérée.

Les propriétés optiques considérées sont le coefficient de réfraction $n(\lambda)$ et le coefficient d'extinction $k(\lambda)$. Ces deux coefficients correspondent respectivement à la partie réelle et à la partie imaginaire du coefficient de réfraction complexe $\hat{n}(\lambda)$: $\hat{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$. De plus, dans notre étude, les longueurs d'onde prises en compte sont celles allant du domaine du visible au proche infrarouge. Il faut noter que dans la suite, l'affichage de la dépendance en λ de tous les coefficients sera omis pour plus de lisibilité.

Goodell et al. (1973 [49]) ont, dans les années 70, étudié en détail les constantes optiques des alliages d'inconel. L'alliage d'inconel qui a été utilisé pour fabriquer nos apodiseurs est l'inconel 600 dont la composition spectroscopique est donnée dans la table 3.1 : ses trois composants principaux sont le Nickel, le Fer et le Chrome.

Métal	Fraction dans la composition
Nickel (plus Cobalt)	75,31
Chrome	15,54
Fer	7,71
Carbone	0,06
Manganèse	0,20
Soufre	0,003
Silicium	0,32
Cuivre	0,09

TAB. 3.1 – Composition chimique de l’alliage d’Inconel 600.

La figure 3.1 montre l’évolution des coefficients de réfraction n et d’extinction k de l’Inconel 600 dans le domaine de longueur d’onde allant du visible au proche infrarouge.

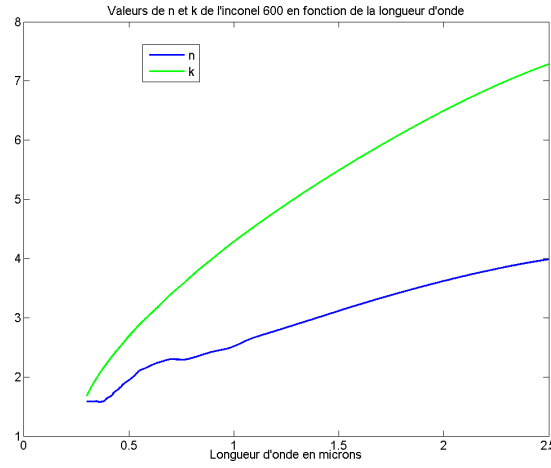


FIG. 3.1 – Evolution des coefficients de réfraction (bleu) et d’extinction(vert) de l’Inconel 600 en fonction de la longueur d’onde.

Evolution des indices de réfraction des substrats utilisés

Deux substrats différents ont été utilisés : pour l’apodiseur visible $3\lambda/D$, le substrat est en BK7 tandis que pour l’apodiseur infrarouge $4\lambda/D$, le substrat est en CaF_2 . La formule approximant l’évolution de l’indice de réfraction d’un verre quelconque en fonction de la longueur d’onde est :

$$n(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{SA_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - SB_1} + \frac{SA_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - SB_2} + \frac{SA_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - SB_3}\right) + 1} \quad (3.1)$$

où λ est donnée en μm .

La table 3.2 donne les valeurs des coefficients SA_1 , SA_2 , SA_3 , SB_1 , SB_2 et SB_3 respectivement pour le BK7 et le CaF_2 .

3.3. Présentation de la simulation du dépôt d'une couche mince

Substrat	SA ₁	SA ₂	SA ₃	SB ₁	SB ₂	SB ₃
BK7	1.0396121	2.3179234.10 ⁻¹	1.0104695	6.0006987.10 ⁻³	2.0017914.10 ⁻²	1.0356065.10 ²
CaF₂	0.5675888	0.4710914	3.8484723	0.00252643	0.01007833	1200.5560

TAB. 3.2 – Valeurs des constantes de l'équation 3.1 pour le BK7 et le CaF_2 .

L'évolution des indices de réfraction du BK7 et du CaF_2 en fonction de la longueur d'onde est représentée à la figure 3.2.

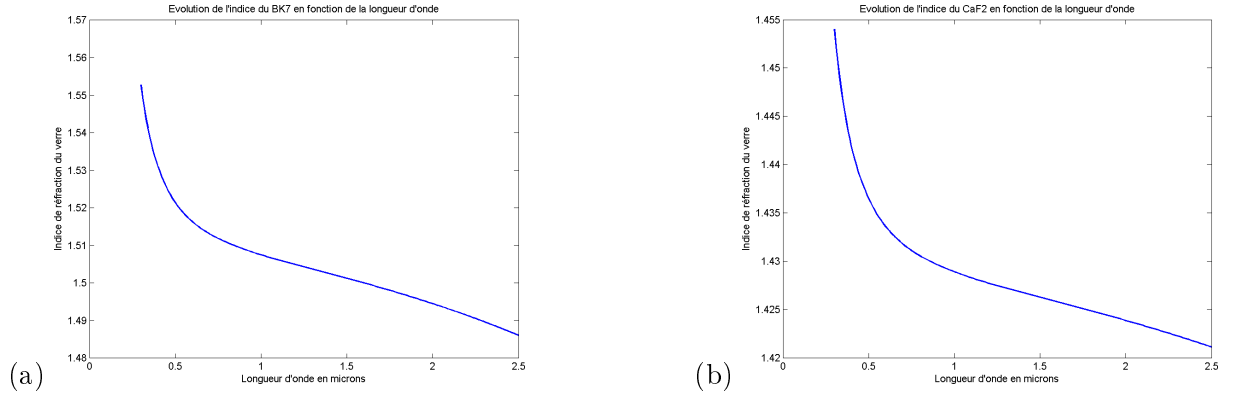


FIG. 3.2 – Evolution des indices de réfraction en fonction de la longueur d'onde des substrats utilisés lors de la fabrication des apodiseurs : (a) BK7 et (b) CaF_2 du visible au proche infrarouge.

L'allure des deux courbes est semblable et présente deux régimes d'évolution : une décroissance très brusque dans le visible qui s'atténue considérablement dans le proche infrarouge. Néanmoins, l'indice du CaF_2 est plus stable : en effet, sur le domaine spectral $[0.4 \mu m - 2.5 \mu m]$, la valeur de l'indice de réfraction du CaF_2 est comprise entre $[1.454 - 1.422]$ contre $[1.55 - 1.487]$ pour le BK7.

3.3 Présentation de la simulation du dépôt d'une couche mince

Nous considérons dans un premier temps le cas d'une seule couche fine d'épaisseur e déposée sur un substrat épais de verre. La figure 3.3 montre la configuration du dépôt d'une couche mince sur un substrat transparent qui a été effectué pour fabriquer nos apodiseurs ainsi que les notations utilisées par la suite.

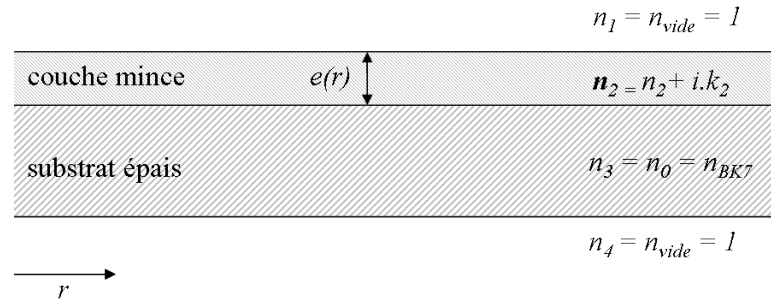


FIG. 3.3 – Schéma des différents interfaces considérés pour la simulation.

Les calculs de transmission dans le cas de couches fines sont explicites dans le "Principles of Optics" de Max Born & Emil Wolf [29] (p. 628-632). On se place dans le cas d'une lumière incidente normale ce qui simplifie les équations.

3.3.1 Expression analytique de la transmittivité et de la réflectivité de l'apodiseur

Le coefficient de réflexion en amplitude r_{12} de l'interface entre les milieux 1 et 2 s'exprime de la manière suivante :

$$r_{12} = \rho_{12}e^{i\phi_{12}} \quad (3.2)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{12}^2 = \frac{(1 - n_2)^2 + k_2^2}{(1 + n_2)^2 + k_2^2} \\ \tan(\phi_{12}) = \frac{2.k_2}{n_2^2 + k_2^2 - 1} \end{array} \right.$$

Le coefficient de transmission t_{12} de l'interface entre les milieux 1 et 2 vaut :

$$t_{12} = \tau_{12}e^{i\chi_{12}} \quad (3.3)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{12}^2 = \frac{4}{(1 + n_2)^2 + k_2^2} \\ \tan(\chi_{12}) = -\frac{k_2}{1 + n_2} \end{array} \right.$$

Le coefficient de réflexion r_{23} de l'interface entre les milieux 2 et 3 s'exprime :

$$r_{23} = \rho_{23}e^{i\phi_{23}} \quad (3.4)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{23}^2 = \frac{(n_0 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_0 + n_2)^2 + k_2^2} \\ \tan(\phi_{23}) = \frac{2.n_0.k_2}{n_2^2 + k_2^2 - n_0^2} \end{array} \right.$$

Le coefficient de transmission t_{23} de l'interface entre les milieux 2 et 3 vaut :

$$t_{23} = \tau_{23}e^{i\chi_{23}} \quad (3.5)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{23}^2 = \frac{4.(n_2^2 + k_2^2)}{(n_0 + n_2)^2 + k_2^2} \\ \tan(\chi_{23}) = \frac{n_0.k_2}{n_2^2 + k_2^2 + n_2.n_0} \end{array} \right.$$

Nous pouvons donc maintenant évaluer les coefficients complexes de réflexion r_{13} et transmission t_{13} de passage du milieu 1 au milieu 3 :

$$r_{13} = \frac{\rho_{12} \cdot e^{i\phi_{12}} + \rho_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\phi_{23}+2n_2\eta)}}{1 + \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\phi_{12}+\phi_{23}+2n_2\eta)}} \quad (3.6)$$

$$t_{13} = \frac{\tau_{12} \cdot \tau_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\chi_{12}+\chi_{23}+n_2\eta)}}{1 + \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\phi_{12}+\phi_{23}+2n_2\eta)}} \quad (3.7)$$

$$\text{où } \eta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} e$$

On obtient finalement la réflectivité totale R_{13} et la transmittivité totale T_{13} :

$$R_{13} = |r_{13}|^2 \quad (3.8)$$

$$T_{13} = n_0 \cdot |t_{13}|^2 \quad (3.9)$$

En ce qui concerne le passage du substrat épais (milieu 3) au vide (milieu 4), puisque le substrat est une couche épaisse, on considère qu'aucun phénomène d'interférence ne se produit. Ainsi le passage du milieu 3 au milieu 4 se répercute uniquement dans l'expression de la transmittivité par un coefficient α :

$$\alpha = \frac{1}{n_0} \cdot \left| \frac{2 \cdot n_0}{n_0 + 1} \right|^2 \quad (3.10)$$

D'où finalement :

$$T_{14} = \alpha \cdot T_{13} = \frac{1}{n_0} \cdot \left| \frac{2 \cdot n_0}{n_0 + 1} \right|^2 \cdot T_{13} \quad (3.11)$$

3.3.2 Expression analytique du déphasage introduit par l'apodiseur

Il est aussi important de connaître le déphasage introduit par l'apodiseur afin de déterminer les aberrations que subit un front d'onde qui le traverse.

Déphasage en réflexion

L'expression du changement de phase δ_r en réflexion introduit par l'apodiseur est donné par la formule suivante :

$$\delta_r = \arctan\left(\frac{\rho_{23}(1 - \rho_{12}^2) \cdot \sin(2 \cdot n_2 \cdot \eta + \phi_{23}) + \rho_{12}(e^{2 \cdot k_2 \eta} - \rho_{23}^2 \cdot e^{-2k_2\eta}) \cdot \sin(\phi_{12})}{\rho_{23}(1 + \rho_{12}^2) \cdot \cos(2 \cdot n_2 \cdot \eta + \phi_{23}) + \rho_{12}(e^{2 \cdot k_2 \eta} + \rho_{23}^2 \cdot e^{-2k_2\eta}) \cdot \cos(\phi_{12})}\right) \quad (3.12)$$

Déphasage en transmission

L'expression du changement de phase δ_t en transmission introduit par l'apodiseur est :

$$\delta_t = \arctan\left(\frac{e^{2k_2\eta} \cdot \sin(2 \cdot n_2 \cdot \eta) - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \sin(\phi_{12} + \phi_{23})}{e^{2k_2\eta} \cdot \cos(2 \cdot n_2 \cdot \eta) - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \cos(\phi_{12} + \phi_{23})}\right) + \chi_{12} + \chi_{23} - n_2\eta + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (n_2 - 1) \cdot e \quad (3.13)$$

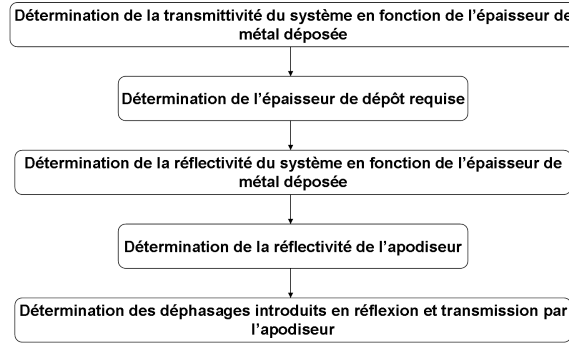


FIG. 3.4 – Etapes du programme de calcul des propriétés optiques de l'apodiseur.

3.3.3 Etapes du programme de calcul

La figure 3.4 présente les étapes de calcul du programme matlab que j'ai développé.

1. Tout d'abord, on détermine la transmittivité totale du système T_{14} en fonction de l'épaisseur de métal déposée. Pour ce faire, on utilise les expressions des équations 3.7, 3.9 et 3.11.
2. On souhaite connaître l'épaisseur e du matériau à déposer. Pour estimer cette épaisseur, nous minimisons une fonction d'erreur pour chaque point i du profil de transmission théorique souhaitée T_{th} . La fonction erreur ϵ_i à minimiser est définie de la manière suivante :

$$\epsilon_i = |T_{th_i} - T_{14_i}(e)|^2$$

Il convient de noter que, pour les calculs d'optimisation, on considère que la transmission nulle correspond à une transmission de 10^{-3} .

3. Puis on calcule la réflectivité totale du système en fonction de l'épaisseur de métal déposée avec les équations 3.6 et 3.8.
4. Ensuite, on détermine la réflectivité radiale de l'apodiseur à partir de l'épaisseur e calculée à l'étape 2.
5. Enfin, on détermine les déphasages introduits par l'apodiseur à l'aide des équations 3.13 et 3.12.

3.4 Résultats des simulations

3.4.1 Présentation des 2 profils en transmission à considérer

L'objectif de la simulation est d'étudier le chromatisme des deux apodiseurs que j'ai été amenée à tester en laboratoire : un apodiseur visible optimisé pour un masque coronographique à $3\lambda/D$ et un apodiseur proche-infrarouge optimisé pour un masque à $4\lambda/D$. Les profils en transmission de ces deux apodiseurs sont données sur la figure 3.6.

Ces apodiseurs ont des profils en transmission de formes différentes : l'apodiseur $3\lambda/D$ a la forme d'une cloche tandis que l'apodiseur $4\lambda/D$ a la forme d'un bagel. Il sera donc intéressant de comparer les propriétés optiques de ces deux composants. Les paramètres entrés dans le programme de calcul sont donnés dans la table 3.3.

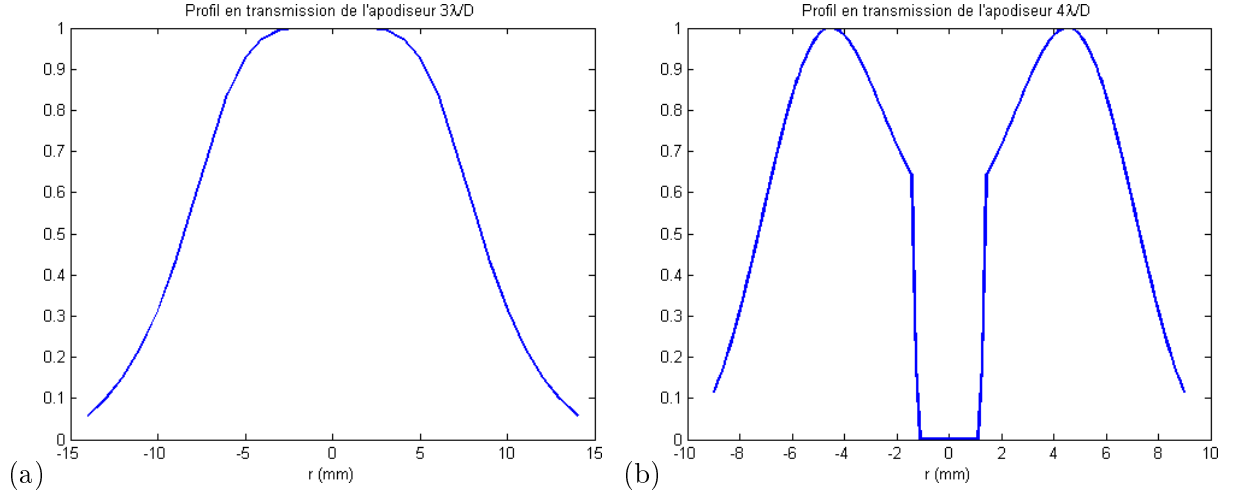


FIG. 3.5 – Profils en transmission des 2 apodiseurs à considérer : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible, (b) apodiseur $4\lambda/D$ infrarouge.

Paramètre	Apodiseur $3\lambda/D$	Apodiseur $4\lambda/D$
Profil en transmission	voir Fig 3.6 (a)	voir Fig 3.6 (b)
Type de substrat	BK7	CaF ₂
Matériau déposé	Inconel	Inconel
Domaine Spectral	Visible	Bandes I, J, H, K

TAB. 3.3 – Paramètres d'entrée de la simulation pour les deux apodiseurs.

3.4.2 Transmittivité totale en fonction de l'épaisseur de métal déposée

La figure 3.6 montre l'évolution de la transmittivité du système en fonction de l'épaisseur e de l'Inconel déposé.

Nous en déduisons que l'épaisseur du dépôt nécessaire à l'obtention d'une faible transmittivité est relativement faible puisque dès 40 nm d'épaisseur déposée la transmittivité est presque nulle. Ceci constitue un bon point dans le but que l'apodiseur engendre des erreurs de front d'onde les plus petites possibles. De plus, la quasi-superposition de toutes les courbes montre la faible chromaticité du dépôt d'Inconel, propriété qui est recherchée pour notre apodiseur.

3.4.3 Epaisseur de dépôt requise pour fabriquer l'apodiseur

La figure 3.7 montre les profils radiaux des épaisseurs de dépôt requises pour fabriquer les apodiseurs désirés.

Pour les régions où la transmission n'est pas nulle, les épaisseurs déposées sont très faibles et ne dépassent pas 20 nm. Du point de vue de l'achromaticité, cette dernière est vérifiée hormis un léger effet de bord pour l'apodiseur $3\lambda/D$.

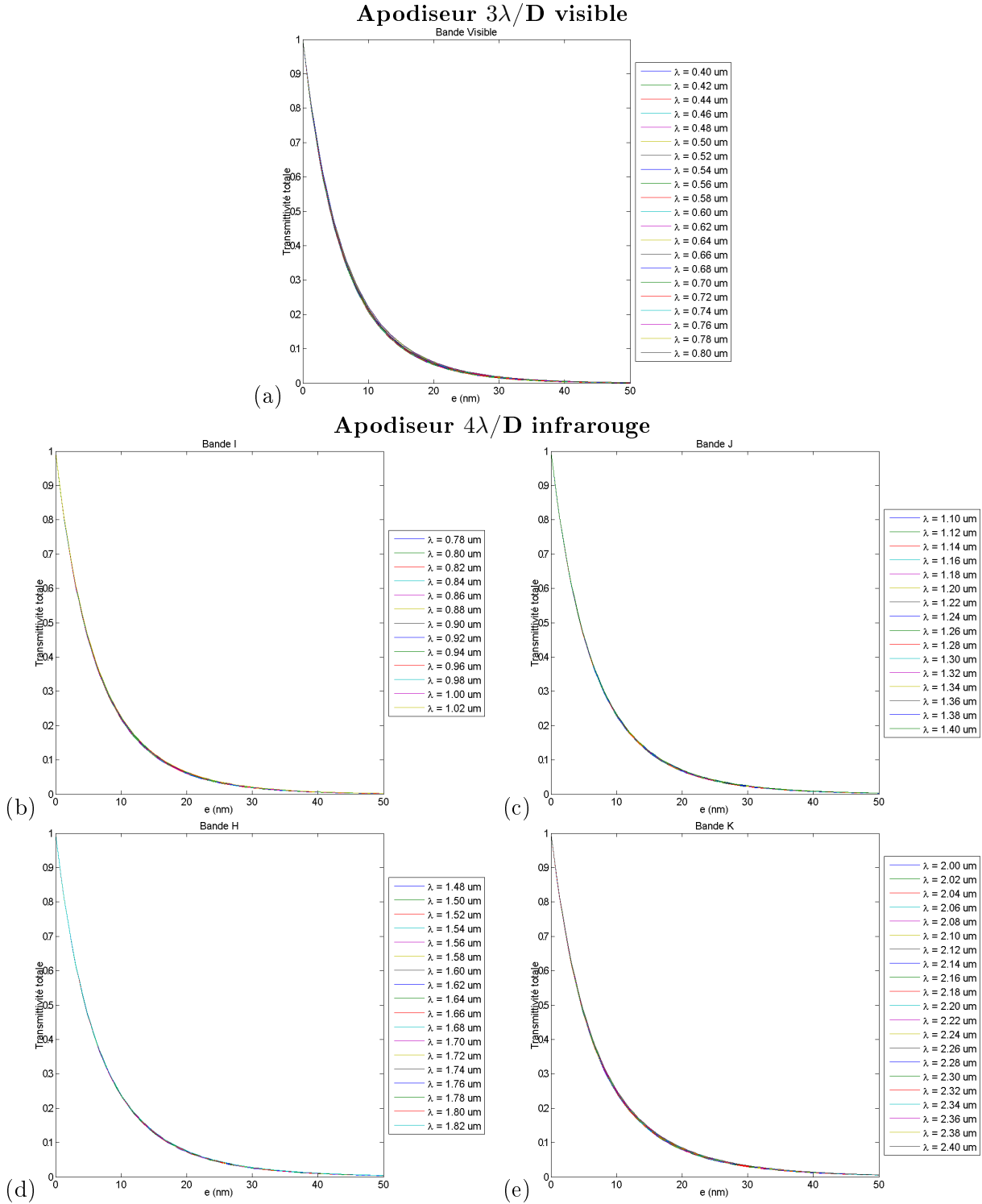


FIG. 3.6 – Transmittivité totale du système en fonction de l'épaisseur d'Inconel déposé dépendant de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

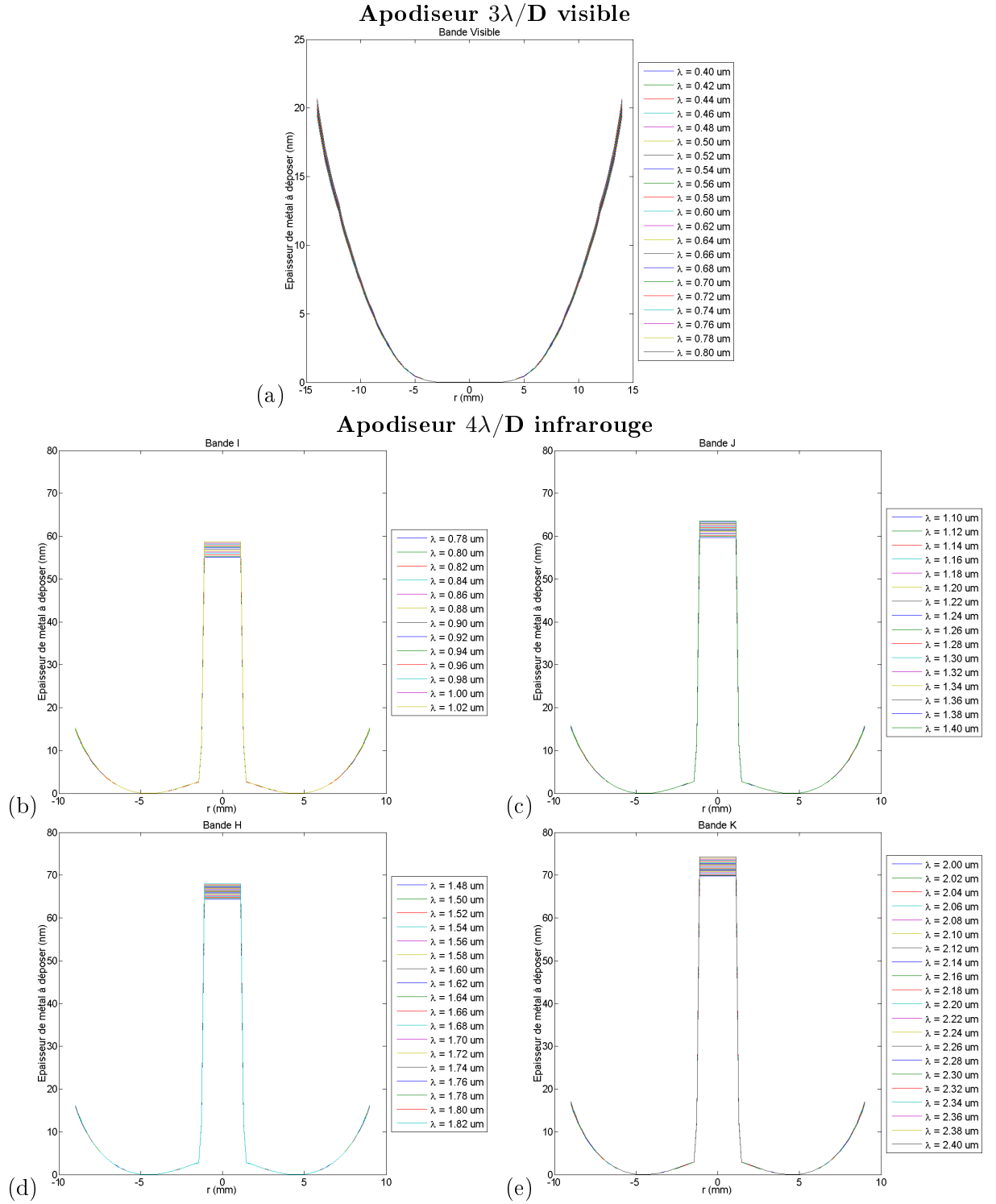


FIG. 3.7 – Épaisseur d’Inconel 600 à déposer radialement en fonction de la longueur d’onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

3.4.4 Réflectivité totale du système en fonction de l'épaisseur du métal déposé

La figure 3.8 montre l'évolution de la réflectivité totale du système en fonction de l'épaisseur de métal déposée pour les deux apodiseurs. Pour l'apodiseur $3\lambda/D$, les courbes se superposent au centre du masque et la chromaticité de la réflectivité est visible sur les bords selon une dispersion de $\pm 10\%$. Pour l'apodiseur $4\lambda/D$, l'allure des courbes est très semblable dans la zone extérieure à l'obstruction centrale et ce, quelle que soit la longueur d'onde.

3.4.5 Réflectivité de l'apodiseur

La figure 3.9 montre les coupes radiales de la réflectivité des 2 apodiseurs.

Pour l'apodiseur $3\lambda/D$, les courbes se superposent au centre et la chromaticité de la réflectivité est visible sur les bords selon une dispersion de $\pm 10\%$. Pour l'apodiseur $4\lambda/D$, l'allure des courbes est très semblable dans la zone extérieure à l'obstruction centrale et ce quelle que soit la longueur d'onde.

A partir de ces courbes, il est possible de calculer le coefficient de réflexion global de l'apodiseur : il vaut environ 20% pour l'apodiseur $3\lambda/D$ et environ 16% à $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ pour le $4\lambda/D$. Ces valeurs sont similaires pour le domaine spectral allant du visible à la bande K $\pm 1\%$. Ce résultat implique que l'absorption de l'Inconel est assez importante : en effet, 24% de la lumière est absorbée pour l'apodiseur $4\lambda/D$ et il y a surtout 40% d'absorption pour l'apodiseur $3\lambda/D$.

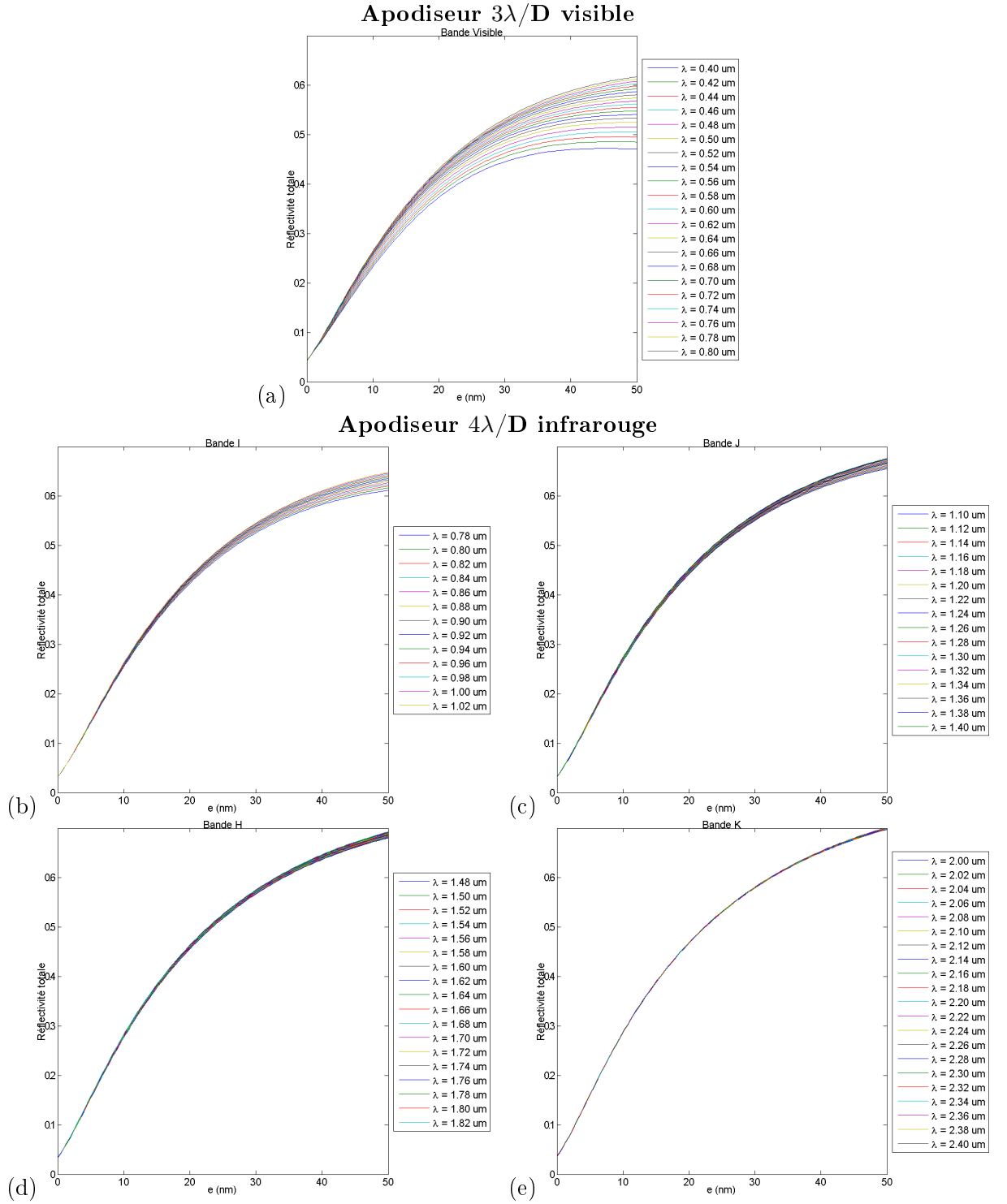


FIG. 3.8 – Réflectivité de l’Inconel 600 en fonction de l’épaisseur déposée et de la longueur d’onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

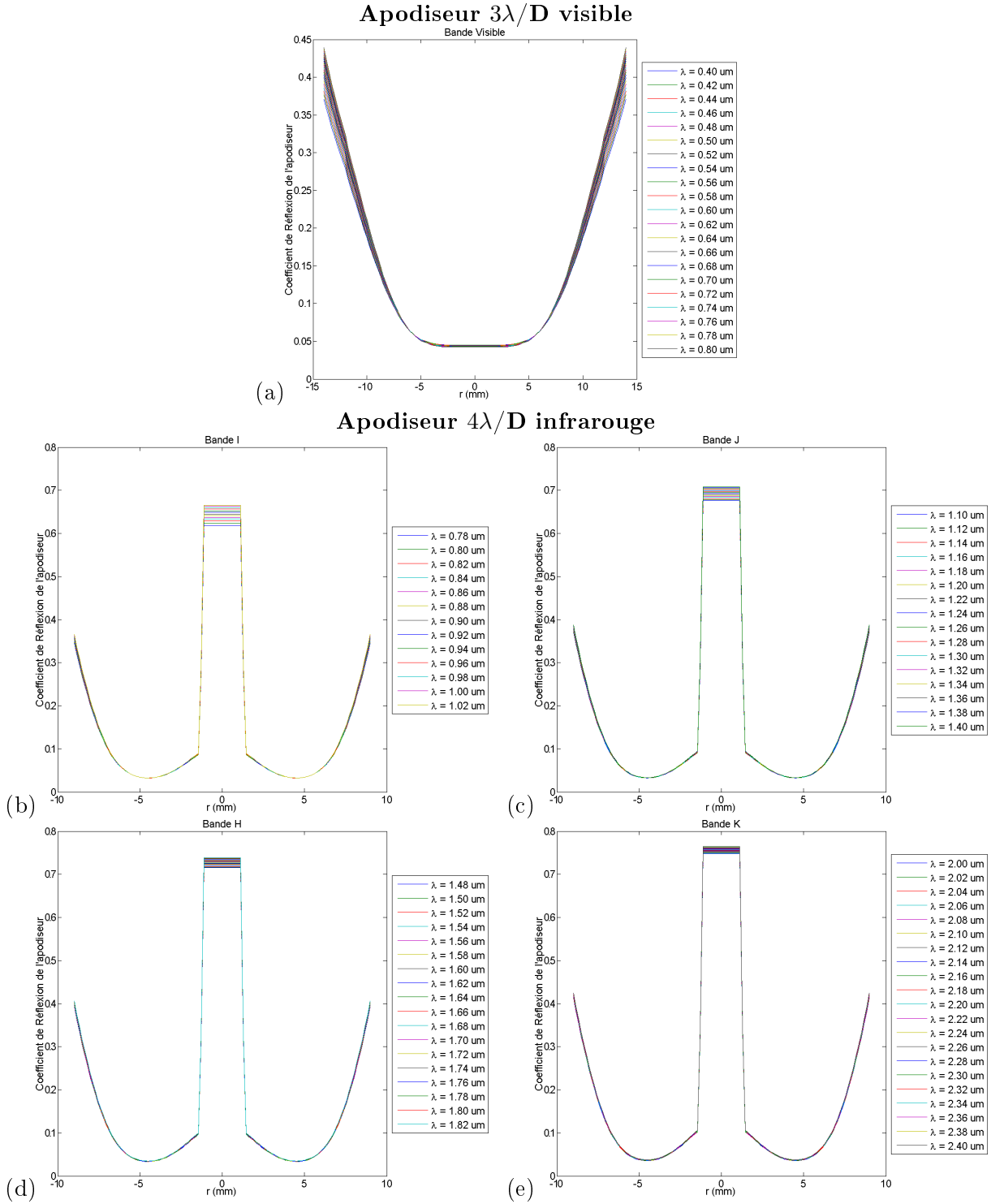


FIG. 3.9 – Réflectivité radiale de l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

3.4.6 Déphasage en réflexion introduit par l'apodiseur

La figure 3.10 montre les profils radiaux du déphasage en réflexion introduit par les apodiseurs. Pour l'apodiseur $3\lambda/D$, les courbes se superposent au centre et la chromaticité du déphasage est visible sur les bords selon une dispersion de $\pm 15\%$. Pour l'apodiseur $4\lambda/D$, l'allure des courbes est très semblable pour une bande spectrale donnée dans la zone extérieure à l'obstruction centrale et ce quelle que soit la longueur d'onde. Néanmoins la valeur du déphasage est très importante, croît avec la bande spectrale, et double de la bande I à la bande K de 300 nm à 600 nm.

3.4.7 Déphasage en transmission introduit par l'apodiseur

La figure 3.11 montre les profils radiaux du déphasage en transmission introduit par les apodiseurs.

La valeur peak to valley de l'erreur de front d'onde introduite est de l'ordre de 65 ± 10 nm pour l'apodiseur $3\lambda/D$ et de 65 ± 10 nm pour l'apodiseur $4\lambda/D$. Pour l'apodiseur $3\lambda/D$, les courbes se superposent au centre et la chromaticité de la réflectivité est visible sur les bords selon une dispersion de $\pm 10\%$. Pour l'apodiseur $4\lambda/D$, l'allure des courbes est très semblable dans la zone extérieure à l'obstruction centrale et ce, quelle que soit la longueur d'onde. Cependant il y a un fort chromatisme du déphasage d'une bande à l'autre. Ce dernier vaut 95 ± 25 nm ce qui est bien supérieur aux spécifications de SPHERE.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai étudié par simulation numérique le chromatisme des propriétés optiques des deux apodiseurs que j'ai été amenée à tester en laboratoire. Tous les deux ont été fabriqués par dépôt métallique d'un alliage d'inconel sur différents substrats de verre.

Après avoir déterminé l'épaisseur d'inconel à déposer pour obtenir le profil de transmission désiré, j'ai ainsi pu déterminer les allures des profils radiaux de la réflectivité engendrée et des déphasages introduits en réflexion et en transmission par les deux apodiseurs sur toute la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement.

Le résultat principal est la faible chromaticité du dépôt d'Inconel. De plus, la réflectivité est faible mais l'absorption et les déphasages introduits sont relativement importants.

Par ailleurs, j'ai aussi réalisé la même étude dans le cas d'un apodiseur bi-substrat prismatique pour lequel la couche métallique d'inconel se trouve collée entre deux lames légèrement prismatiques de L-PHL 2 et de formes complémentaires (document SPHERE, Douet et al., 2007 [41]). Cette idée de faire fabriquer un apodiseur de ce type avait été envisagée par Patrick Rabou du LAOG afin de rejeter les ghosts introduits par l'apodiseur hors du champ de vue d'IRDIS et ce sans introduire de chromatisme. Elle a été abandonnée depuis car elle imposait des conditions plus sévères au niveau d'un traitement anti-reflet et surtout elle augmentait l'épaisseur du composant. Ceci en raison du fait que l'apodiseur sera situé dans l'instrument SPHERE entre les deux prismes du correcteur de dispersion atmosphérique, il doit être le plus fin possible.

Les paramètres qui viennent d'être calculés vont permettre dans les chapitres qui suivent de pouvoir soit comparer la théorie et l'expérience, ou de pouvoir appréhender une simulation plus complète des performances de l'ALC.

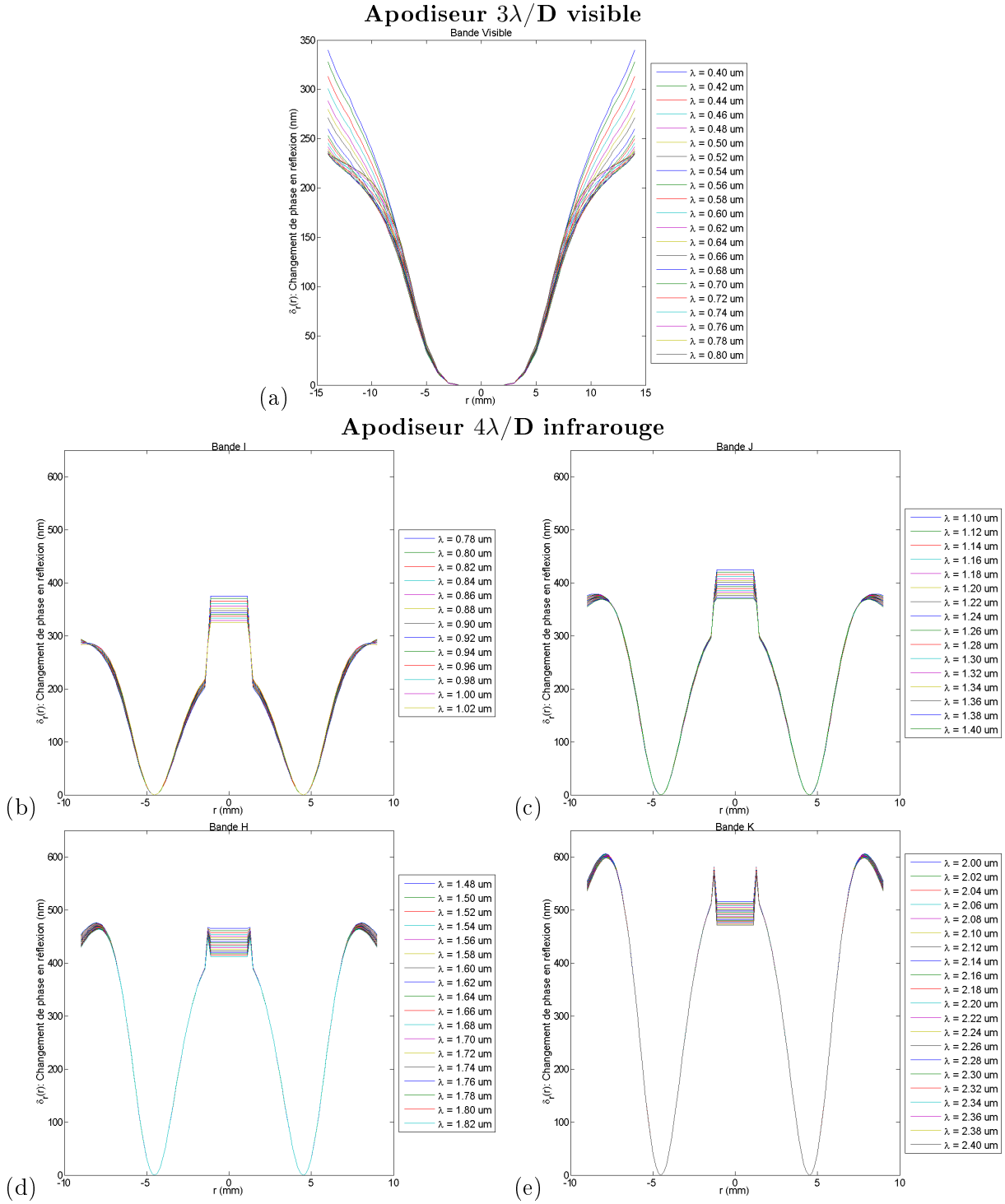


FIG. 3.10 – Déphasage radial en réflexion introduit par l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

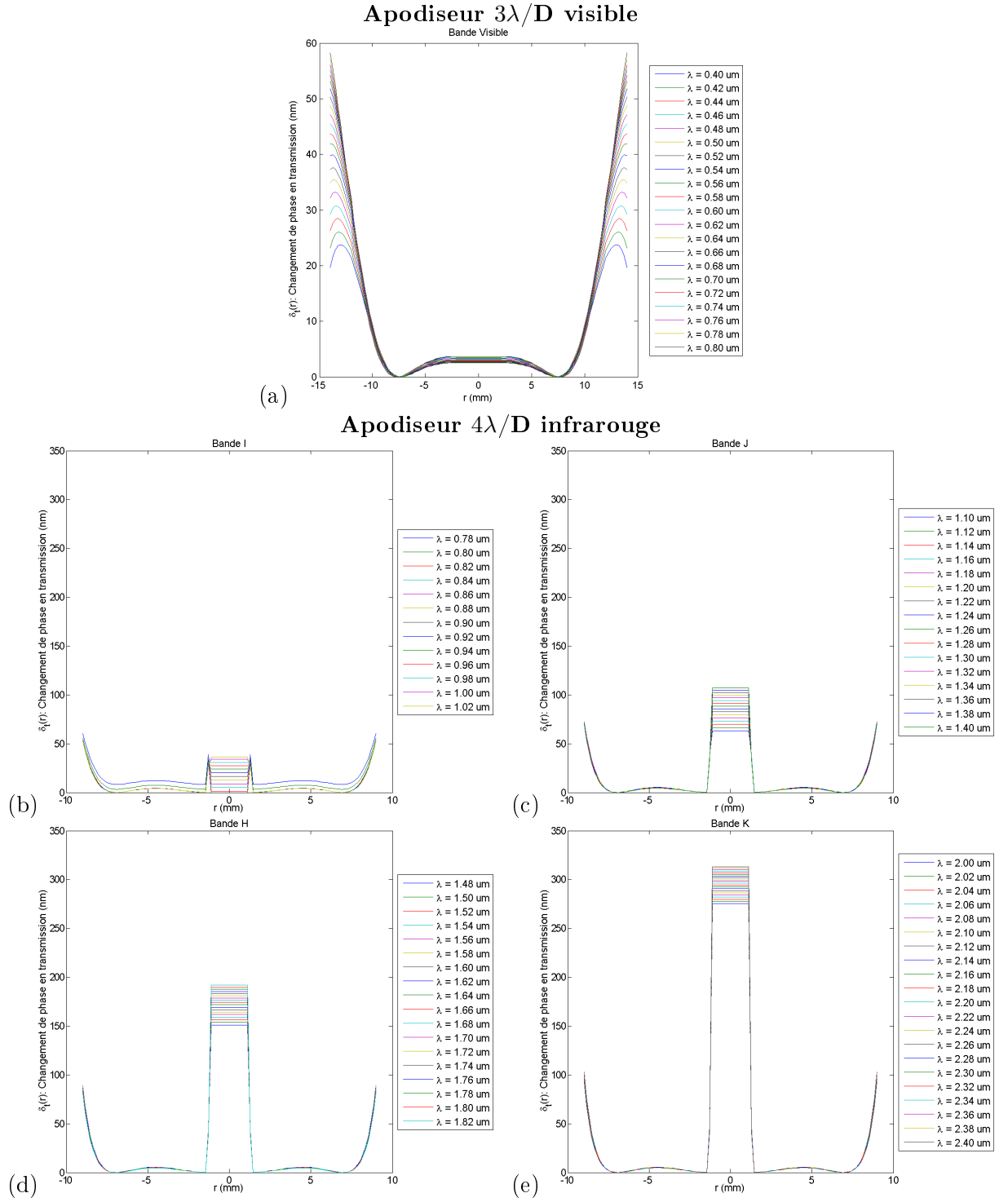


FIG. 3.11 – Déphasage radial en transmission introduit par l'apodiseur en fonction de la longueur d'onde pour différentes bandes spectrales : (a) apodiseur $3\lambda/D$ visible ; apodiseur $4\lambda/D$ en bandes (b) I, (c) J, (d) H, (e) K.

Chapitre 4

Pré-phase B de SPHERE : développement du banc ITHD du laboratoire et caractérisation de l'ALC $3\lambda/D$ visible

4.1 Présentation du banc d'Imagerie à Très Haute Dynamique du laboratoire

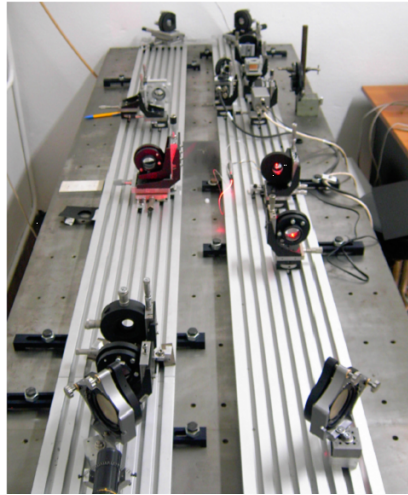


FIG. 4.1 – Photo du banc d'Imagerie à Très Haute Dynamique du LUAN.

Le banc d'Imagerie à Très Haute Dynamique (ITHD) du LUAN/Fizeau est un banc optique destiné aux tests de divers coronographes ; il est en développement depuis mai 2004 sous la responsabilité de Jean-Baptiste Daban. Il est situé dans une salle grise et fonctionne en transmission dans le visible. Jusqu'à présent, il a permis de caractériser le coronographe à couteaux de phase achromatique de l'instrument CORONA (voir partie III suivante) ainsi qu'un coronographe de Lyot apodisé visible destiné aux toutes premières études préliminaires pour le projet SPHERE de faisabilité d'un tel coronographe.

4.1.1 Description des composants du banc ITHD

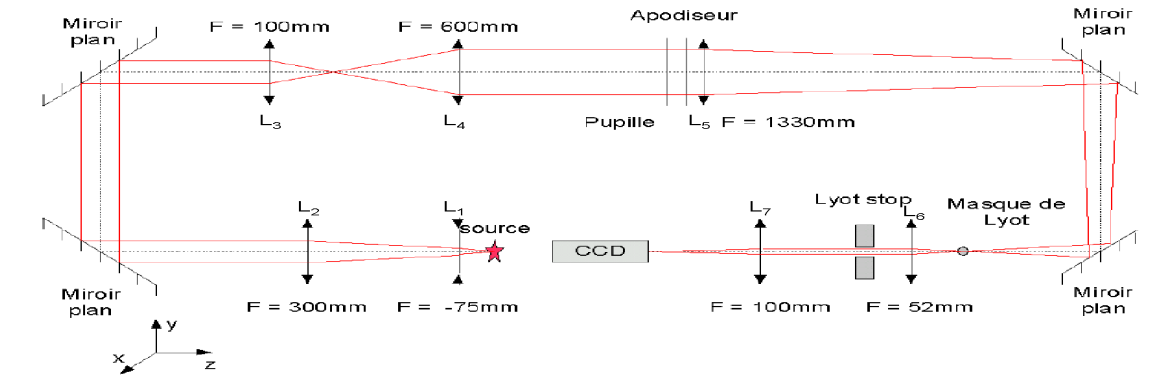


FIG. 4.2 – Schéma descriptif du banc ITHD du LUAN.

Les sources disponibles

Les sources disponibles sont les suivantes :

- Un laser HeNe Melles Griot : 25 LHR 691-230, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, puissance de sortie 2.5mW
- Une diode laser fibrée Melles Griot 57PNL062/P4 : $\lambda = 635 \text{ nm} \pm 15$, puissance de sortie de 7mW, fibre monomode à maintien de polarisation
- Une source blanche de puissance de sortie de 5mW

Les optiques

La figure 4.2 montre la disposition de chaque composant du banc ITHD (dont les caractéristiques sont données dans le tableau 4.1) ainsi que le trajet du faisceau lumineux depuis la source jusqu'à la caméra CCD.

Elément	Caractéristiques
Diode Laser fibrée	$\lambda = 635 \text{ nm}$, $P = 7 \text{ mW}$
Lentille divergente L_1	$f_1 = -75 \text{ mm}$, $\Phi_1 = 18 \text{ mm}$
Lentille convergente L_2	$f_2 = +300 \text{ mm}$, $\Phi_2 = 18 \text{ mm}$
Miroirs plans M_1 et M_2	$\Phi = 50 \text{ mm}$
Lentille convergente L_3	$f_3 = +100 \text{ mm}$, $\Phi_3 = 18 \text{ mm}$
Lentille convergente L_4	$f_4 = +600 \text{ mm}$, $\Phi_4 = 18 \text{ mm}$
Masque pupillaire	$\Phi = 28 \text{ mm}$ voir Fig 4.3 et Sect. 4.1.2.1
Apodiseur	$\Phi = 28 \text{ mm}$ voir Fig 4.4 et Sect. 4.1.2.2
Lentille convergente L_5 (achromat)	$f_5 = +1330 \text{ mm}$, $\Phi_5 = 31.5 \text{ mm}$
Miroirs plans M_3 et M_4	$\Phi = 15 \text{ mm}$
Masque coronographique de Lyot	$\Phi = 90 \mu\text{m}$ voir Sect. 4.1.2.3
Lentille relais convergente L_6 (achromat)	$f_6 = +52 \text{ mm}$, $\Phi_6 = 18 \text{ mm}$
Lyot stop	$\Phi = 1.06 \text{ mm}$, voir Sect. 4.1.2.4
Lentilles d'imagerie convergente L_7 (achromat)	$f_7 = +100 \text{ mm}$, $\Phi_7 = 18 \text{ mm}$
Caméra de Science	CCD Adimec

TAB. 4.1 – Descriptif des composants du banc ITHD du LUAN.

Les lentilles L_1 , L_2 , L_3 et L_4 forment deux systèmes afocaux successifs qui permettent de collimater le faisceau de manière à obtenir derrière la lentille L_4 un faisceau parallèle de diamètre égal à celui de l'apodiseur, le faisceau obtenu a été ainsi agrandi d'un facteur 24 par rapport au faisceau initial. Vient ensuite la chaîne coronographique à proprement parler. Il faut noter que les 4 miroirs plans ont uniquement pour fonction de replier le faisceau dans l'emplacement disponible.

Le détecteur

Le détecteur utilisé est une caméra CCD Adimec-1000M de 10 bits de dynamique. La table 4.2 donne les caractéristiques principales de cette caméra.

Caractéristique	Valeur
Nombre de pixels	1004×1004
Taille du pixel	$7.4 \times 7.4 \mu\text{m}$
Dynamique	10 bits
Temps d'exposition	$10 \mu\text{s}$ à 10 s
Taux de rafraîchissement	50 fps à pleine résolution
Efficacité quantique maximum	40% at 500 nm
Bande passante (FWHM)	360 – 640 nm
ADU	$7 e^-/\text{compte}$
Bruit de lecture	$16 e^-$

TAB. 4.2 – Spécifications techniques de la caméra CCD de science ADIMEC-1000M.

Le software fourni avec le détecteur permet d'effectuer des acquisitions en continu avec un faible taux de rafraîchissement ou de prendre des poses courtes. De plus, un programme écrit en C++ par Lyu Abe permet d'acquérir des poses longues.

Enfin, pour pallier aux saturations du détecteur, une roue à densités neutres est également disponible. La table 4.3 dresse l'inventaire des densités neutres disponibles.

Numéro de l'emplacement	Valeur de la densité neutre	Transmission
1	0.15	70.79 %
2	0.3	50.12 %
3	0.4	39.81 %
4	0.6	25.12 %
5	0.9	12.59 %
6	2.5	0.32 %

TAB. 4.3 – Inventaire des densités neutres présentes sur la roue à densités.

4.1.2 Description des composants propres à l'ALC $3\lambda/D$

L'étude du dimensionnement et de l'optimisation des composants propres à l'ALC $3\lambda/D$ ont été réalisés par Lyu Abe et Mathilde Beaulieu lors de la phase A d'étude de SPHERE.

4.1.2.1 Le masque pupillaire

Le masque pupillaire reproduit la pupille d'entrée du VLT comme on peut le voir sur la figure 4.3. Il a été fabriqué par la société Micromodule (Brest, France) par dépôt de chrome sur un substrat de BK7. Le masque est transmissif à 100% sur un disque de diamètre de 28mm appelé

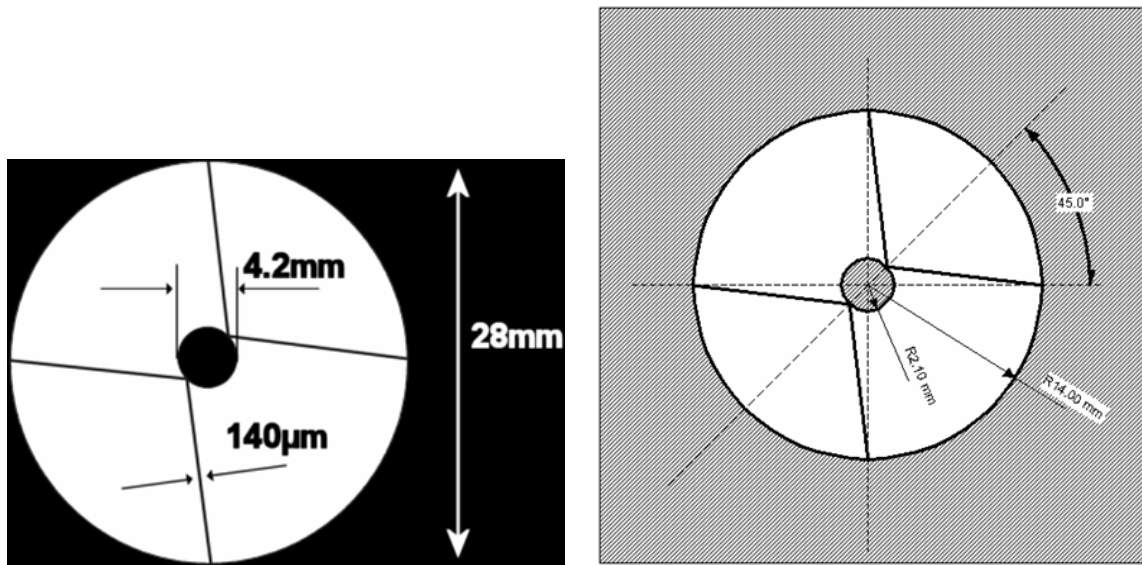


FIG. 4.3 – Forme et taille du masque pupillaire d'entrée reproduisant la pupille du VLT.

diamètre extérieur. Il est bloquant sur un disque central concentrique au premier disque et de diamètre 4.2 mm qui simule l'obstruction centrale (son diamètre correspond à 15% du diamètre du premier disque). 4 branches rectilignes simulent les araignées d'une largeur de $140\ \mu\text{m}$. Elles joignent les quatre points cardinaux du diamètre extérieur à l'obstruction centrale en 2 points d'attache. La table 4.4 donne les spécifications de fabrications du masque pupillaire.

Paramètre	Spécification
Diamètre extérieur	$28.00 \pm 0.05\ \text{mm}$
Diamètre de l'obstruction centrale	$4.20 \pm 0.05\ \text{mm}$
Largeur des araignées	$0.140 \pm 0.01\ \text{mm}$
Densité optique du masque	$10^6 \pm 10^{0.5}$
Type de substrat	BK7
Epaisseur de substrat	1.5 mm
Qualité optique du substrat	$\lambda/4$ PTV à $\lambda = 633\ \text{nm}$ sur la face avant
Parallélisme du substrat	$\leq 1'$
Traitement Antireflet	sur la face arrière ($<0.5\%$)

TAB. 4.4 – Spécifications du masque pupillaire.

4.1.2.2 L'apodiseur

L'apodiseur $3\lambda/D$ a été fabriqué par la société Reynard Corporation selon la technique de dépôt métallique d'une couche mince d'Inconel 600TM sur un substrat de BK7. La table 4.5 donne les spécifications de fabrication de l'apodiseur qui ont été demandées au fabricant. Il faut

Caractéristique	Spécification
Diamètre extérieur de la zone apodisée	28.00 mm
Diamètre extérieur du substrat	40.00 mm
Epaisseur du substrat	2 mm
Qualité de surface du substrat (scratch et dig)	5 - 10
Qualité de surface optique	$\lambda/10$ PTV à 632.8 nm
Parallélisme	$\leq 1'$
Matériau du substrat	BK7
Métal à déposer	Inconel
Profil en transmission du dépôt	voir fig 4.4
Tolérance sur le profil	$\pm 5\%$
Traitement	Anti-reflet sur les 2 faces
Température d'utilisation	$0^\circ C$ à $50^\circ C$

TAB. 4.5 – Spécifications de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible.

noter que, pour la caractérisation de la qualité de surface, les termes scratch et dig correspondent respectivement aux rayures et aux creux qui peuvent être présents.

La figure 4.4 montre le profil radial en transmission théorique optimal de l'apodiseur $3\lambda/D$.

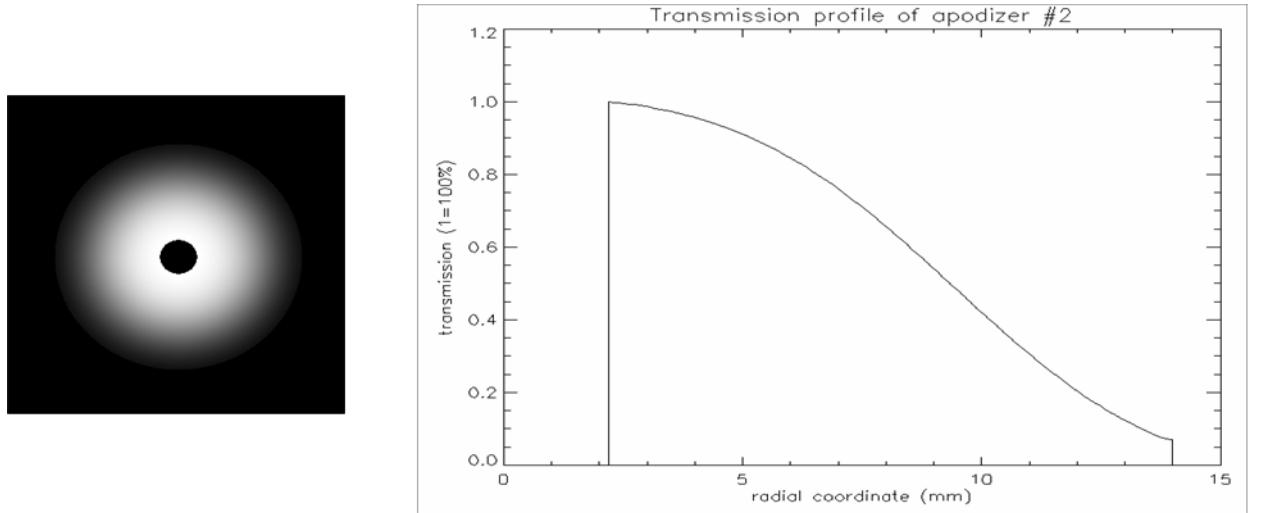


FIG. 4.4 – Transmission théorique de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible envoyée au fournisseur : (gauche) vue 2D, (droite) profil radial optimal en transmission.

Ce profil, noté $T(r, \theta)$ est approximé par le polynôme du 7^{ème} ordre défini par :

$$\forall \theta \quad T(r, \theta) = \sum_{k=0}^7 C_k * \left(\frac{r}{14}\right)^k$$

avec :

- r donné en mm et $2.1 \leq r \leq 14$
- $C_0 = 0.95610110$
- $C_1 = 0.99129289$
- $C_2 = -7.6010470$
- $C_3 = 26.988797$
- $C_4 = -61.164585$
- $C_5 = 70.131699$
- $C_6 = -38.251457$
- $C_7 = 8.0134063$

Le profil en transmission de la région pour laquelle le rayon est inférieur à 2.1 mm est d'importance moindre puisqu'elle sera masquée par l'obstruction centrale du masque pupillaire. Avant expédition du composant, le fabricant a effectué une mesure de contrôle du profil en transmission. Le résultat de cette mesure est donné sur la gauche de la figure 4.5.

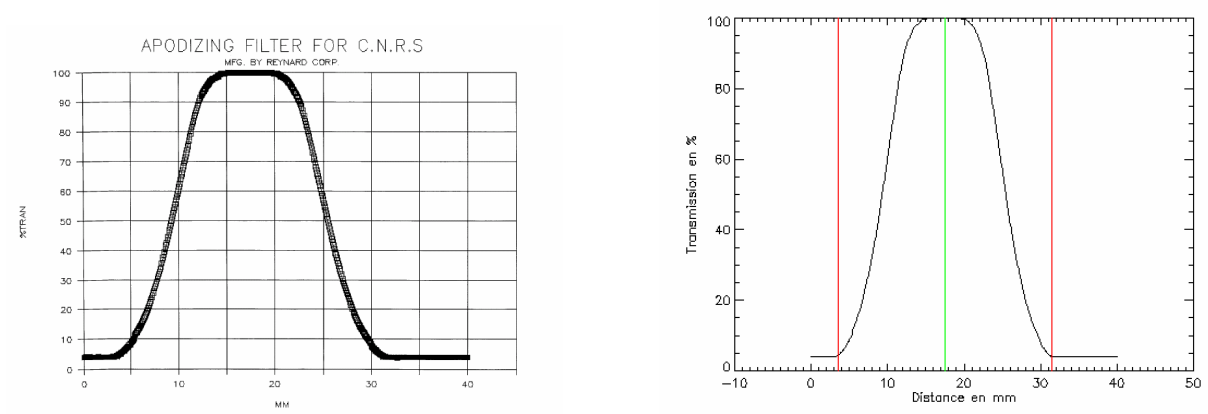


FIG. 4.5 – Mesure de la transmission de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible effectuée par le fabricant Reynard Corp : (gauche) document fourni, (droite) interprétation.

La mesure fournie est une coupe de la transmission ; aucune autre information concernant la manière dont a été prise cette mesure ne nous a malheureusement été fournie. Si l'on considère le graphe de droite de la figure 4.5, le trait vert matérialise le centre effectif de l'apodiseur sur son substrat alors que les deux traits rouges sont respectivement situés à plus ou moins la valeur du rayon de l'apodiseur. On en conclut que la valeur du diamètre extérieur de la zone apodisée est conforme à la spécification. De plus, il apparaît que la zone apodisée n'est pas centrée sur son substrat : ceci implique la nécessité d'avoir un système mécanique précis de centrage et d'alignement de l'apodiseur.

Afin d'effectuer une première qualification du composant, il est possible de superposer la mesure du fabricant au profil théorique ainsi qu'aux limites de tolérance : on obtient ainsi la figure 4.6. Il apparaît donc que l'apodiseur fabriqué est hors spécification dans la région où le rayon est compris entre 7 mm et 12 mm puisque la courbe mesurée est en dehors de la limite de tolérance de -5% . Néanmoins, l'allure continue du profil par comparaison avec le premier prototype constitue un bon point montrant que le processus de fabrication a été mieux respecté et maîtrisé. Par ailleurs, il est aussi possible d'obtenir la valeur de la transmission globale moyenne de l'apodiseur fabriqué : sa valeur est de 39% , elle est plus faible que celle de l'apodiseur théorique qui est

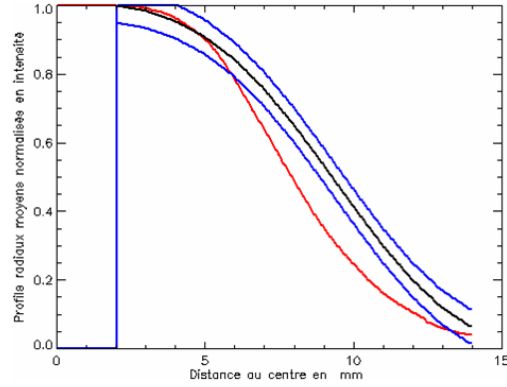


FIG. 4.6 – Profil radial moyen de la transmission de l'apodiseur $3\lambda/D$ visible obtenu à partir de la mesure effectuée par le fabricant Reynard Corp (courbe rouge) ; pour comparaison sont tracés en noir le profil théorique et en bleu le profil théorique $\pm 5\%$.

de 43.9%. Cette perte en transmission globale est due à la région où le profil en transmission de l'apodiseur est en dessous des spécifications. La caractérisation complète du composant est présentée dans la section suivante.

4.1.2.3 Le masque coronographique

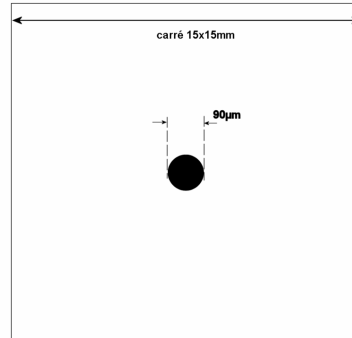


FIG. 4.7 – Forme et taille du masque coronographique à $3\lambda/D$.

Le masque coronographique bloque la lumière au niveau d'un disque central de $90\mu m$ de diamètre (ce qui correspond à un diamètre angulaire de $3\lambda/D$) et la laisse passer ailleurs.

De nouveau, ce composant a été fabriqué par la société Micromodule par dépôt de chrome sur un substrat de BK7. Des simulations effectuées par Mathilde Beaulieu ont montré qu'une densité optique de 6 était nécessaire au niveau de la zone opaque pour obtenir l'effet coronographique souhaité.

La table 4.6 donne les spécifications de fabrication du masque coronographique.

Caractéristique	Spécification
Tolérance sur la largeur du composant (carré)	15.0 ± 1.0 mm
Tolérance sur le diamètre du masque coronographique	90.0 ± 1.0 mm
Densité optique du masque	6.0 ± 0.5
Type de substrat	BK7 ou N-BK7
Epaisseur de substrat	1.5 mm
Qualité optique du substrat	$\lambda/4$ PTV à $\lambda = 633$ nm sur la face avant
Parallélisme du substrat	$\leq 1'$
Traitement Antireflet	aucun

TAB. 4.6 – Spécifications du masque coronographique $3\lambda/D$.

4.1.2.4 Le diaphragme de Lyot

Le diaphragme de Lyot a une forme identique à celle de la pupille du VLT comme on peut le voir sur la figure 4.8. Il a aussi été fabriqué par la société Micromodule par dépôt de chrome sur un substrat de BK7.

Ce diaphragme est géométriquement homothétique du masque pupillaire : le diamètre de l'obstruction centrale est légèrement agrandi, le diamètre du disque extérieur est légèrement diminué, les branches d'araignées sont élargies mais leur orientation est identique à celle du masque pupillaire.

Les simulations ont montré que le meilleur diaphragme de Lyot (selon les critères d'atténuation et de transmission optimales) a un diamètre extérieur correspondant à 97% de la taille de l'image de la pupille, une obstruction plus large d'un facteur 1,05 par rapport à la taille de l'obstruction dans le plan pupille coronographique et des branches d'araignées plus grosses d'un facteur 2.

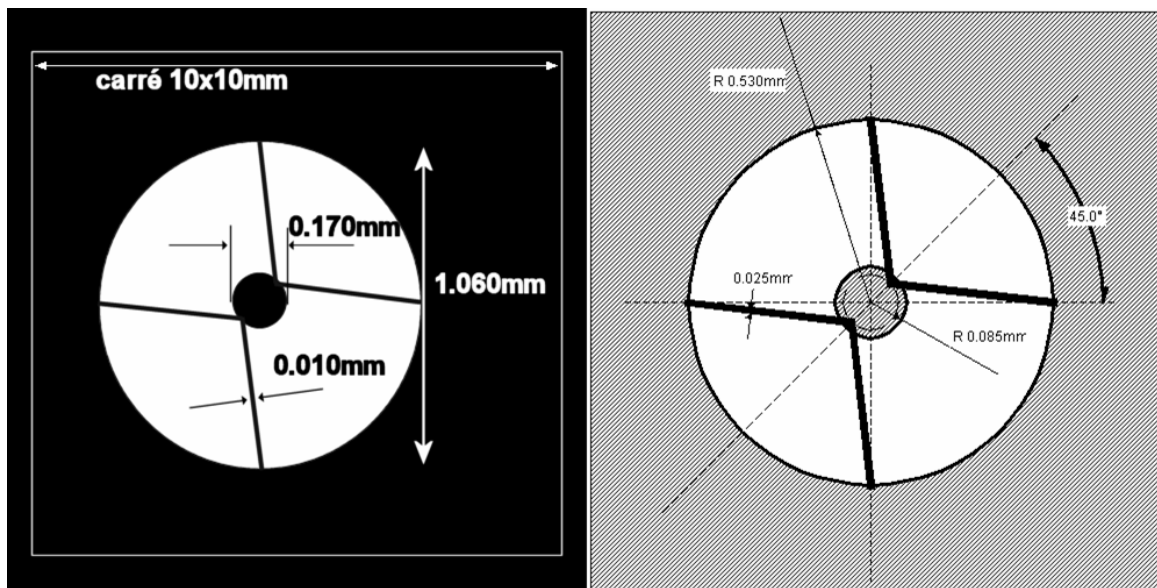


FIG. 4.8 – Dimensions et angles pour la fabrication du Lyot stop.

Par ailleurs, des tests en laboratoire ont montré qu'il est préférable de légèrement sous-dimensionner la taille du Lyot stop afin de s'affranchir de certains biais instrumentaux comme par exemple les effets de diffraction de bord ou les tolérances sur les distances focales des lentilles.

La table 4.7 donne les spécifications de fabrication du diaphragme de Lyot.

Paramètre	Spécification
Diamètre extérieur	1.060 ± 0.01 mm
Diamètre de l'obstruction centrale	0.170 ± 0.01 mm
Largeur des araignées	0.010 ± 0.002 mm
Densité optique du masque	6 ± 0.5
Type de substrat	BK7
Epaisseur de substrat	2 mm
Qualité optique du substrat	$\lambda/4$ PTV à $\lambda = 633$ nm sur la face avant
Parallélisme du substrat	$\leq 1'$

TAB. 4.7 – Spécifications du diaphragme de Lyot.

4.1.3 Processus d'alignement du banc ITHD

Les grandes étapes du processus d'alignement du banc ITHD sont les suivantes :

- Réglage des deux systèmes afocaux permettant d'obtenir un faisceau collimaté de 28 mm de diamètre.
- Mise en place et centrage de la lentille L_5 .
- Mise en place et centrage du masque pupillaire devant la lentille L_5 .
- Détermination du foyer de la lentille L_5 : on place la caméra CCD au niveau du plan focal théorique de la lentille et on la déplace longitudinalement. Le foyer correspond à l'endroit où le faisceau est le plus ponctuel possible.
- Réglage de la position de la lentille L_6 par autocollimation.
- Mise en place et centrage de la lentille L_7 et ajustement de sa position longitudinale de manière à ce que la taille de l'image de la pupille coronographique conjuguée sur le CCD soit convenable.
- Mise en place et centrage de l'apodiseur en imageant la pupille coronographique sur le détecteur.
- Mise en place du diaphragme de Lyot : le détecteur image toujours la pupille conjuguée et l'on place le Lyot stop entre les deux lentilles L_6 et L_7 . On règle la position longitudinale du Lyot stop de manière à ce que son image soit la plus nette possible (centre de la figure 4.9). Ensuite, le Lyot stop est parfaitement centré lorsque l'on ne voit plus qu'une seule paire d'araignées (droite de la figure 4.9).

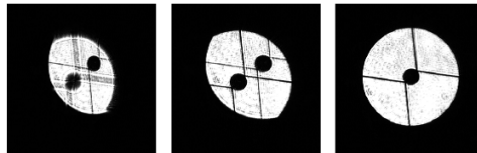


FIG. 4.9 – Etapes du réglage de la position du diaphragme de Lyot : (gauche) diaphragme de Lyot non focalisé ni centré, (centre), diaphragme de Lyot uniquement focalisé, (droite) diaphragme de Lyot focalisé et centré.

- Mise en place du masque coronographique : on place grossièrement le masque coronographique à la position théorique du plan focal image de la lentille L_5 . On se place dans le plan focal final et on éclaire le masque coronographique par une lumière blanche afin d'obtenir l'image de la pastille coronographique la plus nette possible. Puis on centre la pastille sur la PSF. Si on image la pupille coronographique conjuguée, celle-ci s'assombrit lorsque le masque est bien focalisé (centre de la figure 4.10) et s'obscurcit uniformément lorsque le masque est à la fois focalisé et centré (droite de la figure 4.10).

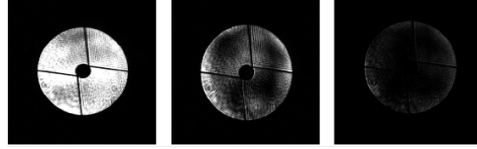


FIG. 4.10 – Etapes du réglage du centrage du masque coronographique : (gauche) masque non focalisé ni centré, (centre), masque uniquement focalisé, (droite) masque focalisé et centré.

4.2 Etude expérimentale du coronographe de Lyot apodisé $3\lambda/D$ dans le visible

4.2.1 Préambule : présentation des différentes étapes de la qualification du coronographe

La qualification du coronographe et de ses composants s'effectue en plusieurs étapes qui sont les suivantes :

- Caractérisation de l'apodiseur : détermination du profil radial en transmission afin de vérifier que le composant suit bien les spécifications notamment que le dépôt ne présente pas de discontinuités majeures puis étude de la chromaticité du dépôt d'Inconel en déterminant l'évolution des coefficients de transmission et de réflexion dans le domaine spectral [450 nm - 700 nm] .
- Caractérisation du masque coronographique : étude des performances coronographiques du coronographe de Lyot classique à $3\lambda/D$ et comparaison avec les simulations numériques.
- Détermination des performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$: obtention des PSF non coronographiées avec et sans apodiseur et de la PSF coronographiée et comparaison avec les simulations numériques.
- Estimation de la sensibilité des performances de l'ALC en fonction des déplacements longitudinaux et latéraux de ces composants afin de déterminer des tolérances mécaniques.

4.2.2 Caractérisation de l'apodiseur en lumière quasi monochromatique autour de $\lambda = 600$ nm

Les objectifs de cette première mesure de caractérisation sont les suivants :

- Déterminer expérimentalement les caractéristiques de l'apodiseur et vérifier avec les données fournies par le constructeur.
- Vérifier l'uniformité du dépôt et la symétrie de l'apodiseur.

Pour ce faire, il est absolument nécessaire que l'apodiseur soit éclairé par un faisceau dont la répartition d'éclairement est la plus homogène et uniforme possible. Cette mesure devait être initialement réalisée avec le laser HeNe à $\lambda = 632.8$ nm : cependant, la répartition d'éclairement obtenue était loin d'être uniforme et présentait des franges d'interférences à cause de la grande cohérence du front d'onde en lumière monochromatique laser . Pour s'affranchir de ce problème, le laser a été remplacé par la source blanche munie d'un filtre interférentiel de bande passante étroite ($\Delta\lambda = 25$ nm) et de longueur d'onde centrale ($\lambda_c = 603$ nm) la plus proche possible de celle du laser HeNe suivant les filtres disponibles.

La figure 4.11 représente le protocole expérimental.

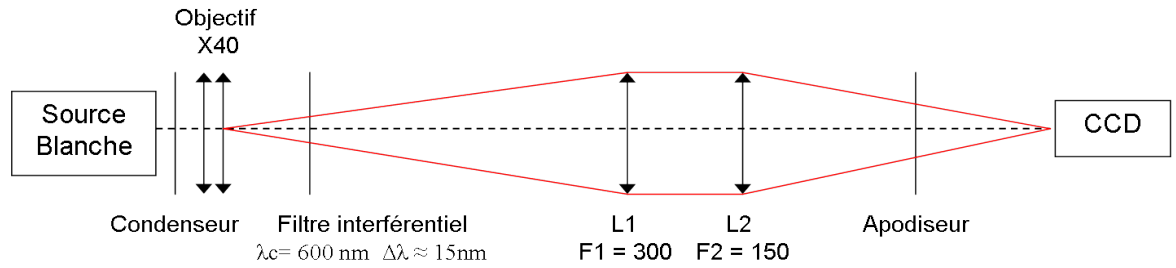


FIG. 4.11 – Schéma de principe de la mesure de transmission de l'apodiseur.

On place la caméra CCD dans un faisceau divergent, la position de la caméra est choisie de manière à illuminer un maximum de pixels. On acquiert une série d'images sans apodiseur dites de pupille de référence. On place ensuite le masque pupillaire et on effectue une acquisition. Ceci permet de déterminer la position du centre optique et le diamètre en pixels sur la caméra équivalent à celui d'une pupille de 28 mm de diamètre. On enlève le masque pupillaire, on place l'apodiseur et on acquiert une série d'images. Afin de s'affranchir des défauts d'uniformité d'éclairement de la pupille de référence, la caractérisation de l'apodiseur s'effectue sur la pupille apodisée divisée, à savoir la division de la pose longue des images de pupille apodisée sur la pose des images de pupille de référence.

On effectue une coupe de la pupille apodisée divisée tous les degrés : les 360 coupes obtenues ainsi que les limites de tolérance sont représentées sur la figure 4.12. A partir de ces 360 coupes, on détermine la coupe moyenne que l'on compare à la coupe que nous avait transmis le fabricant.

L'allure des deux coupes est similaire ce qui atteste de l'absence de discontinuités majeures du dépôt d'Inconel et constitue une avancée par rapport au premier prototype d'apodiseur qui nous avait été fourni. Par contre, il apparaît que, dans les zones de transmission différentes de 1, la mesure de Reynard est systématiquement en dessous de mes mesures : l'écart entre les courbes est de l'ordre de 3%. La méthode de mesure de Reynard est donc néanmoins validée.

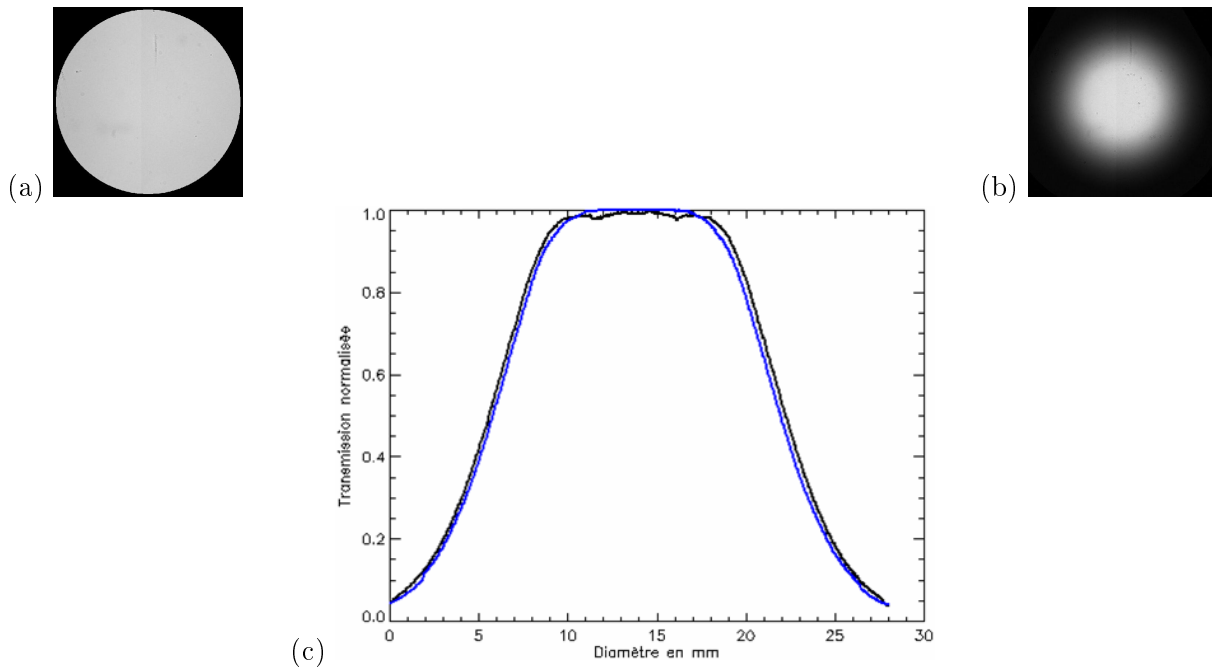


FIG. 4.12 – (a) Image de la pupille de référence, (b) image de la pupille apodisée, (c) coupe de transmission de l'apodiseur : (noir) coupe moyenne obtenue à partir de 360 coupes de la pupille apodisée mesurée, (bleu) coupe fournie par le fabricant.

Ensuite, il est nécessaire de comparer la mesure au profil théorique ainsi qu'aux limites de tolérances : la figure 4.13 montre les différents profils radiaux moyens.

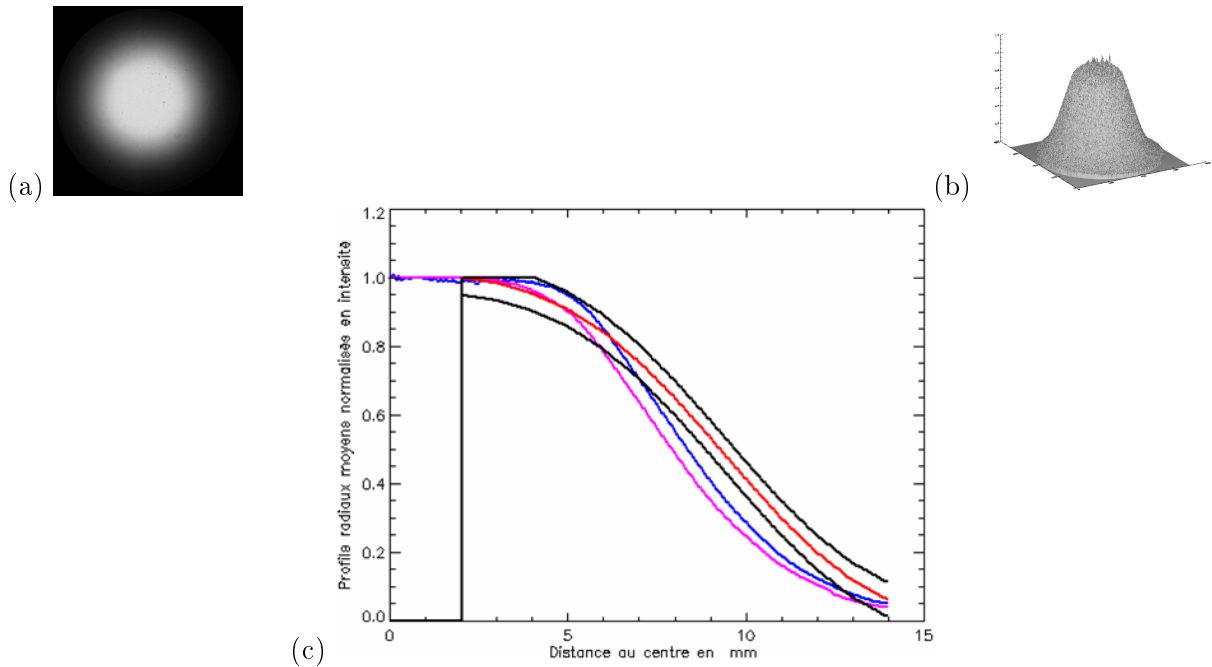


FIG. 4.13 – Vue 2D (a) et 3D (b) de la pupille apodisée divisée, (c) profil radial moyen de transmission de l'apodiseur : (bleu) profil mesuré, (rose) profil mesuré par le constructeur, (rouge) profil théorique, (noir) limites de tolérance.

Deux zones de non conformité aux spécifications apparaissent :

- r compris entre 4.8 mm et 6 mm : la limite de tolérance haute est très légèrement dépassée.
- r compris entre 8.8 mm et 11 mm : la limite de tolérance basse est dépassée.

Par ailleurs, la transmission globale de l'apodiseur est de 39,9%.

4.2.3 Mesure des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ en lumière monochromatique à $\lambda = 632.8$ nm

4.2.3.1 Mesure des performances coronagraphiques d'un coronographe de Lyot $3\lambda/D$ classique (CLC)

Afin de caractériser le masque coronagraphique, on effectue des acquisitions sans apodiseur : ceci revient à caractériser un coronographe de Lyot $3\lambda/D$ classique dans le visible. La figure 4.14 montre un exemple de poses longues obtenues après sommation de 1000 poses courtes ($T_i=5$ ms). Afin de pallier à la saturation du détecteur, des densités neutres ont dû être placées derrière la diode laser fibrée qui simule l'étoile artificielle : pour l'acquisition des images de référence, l'atténuation totale des densités ajoutées est égale à 6.5 et elle est de 4.9 pour l'acquisition des images coronographiées.

L'allure des profils radiaux moyens expérimentaux corrobore les profils théoriques ; néanmoins, les pics peu creusés des PSF expérimentales sont dus à la dynamique de numérisation du détecteur limitée à 10 bits.

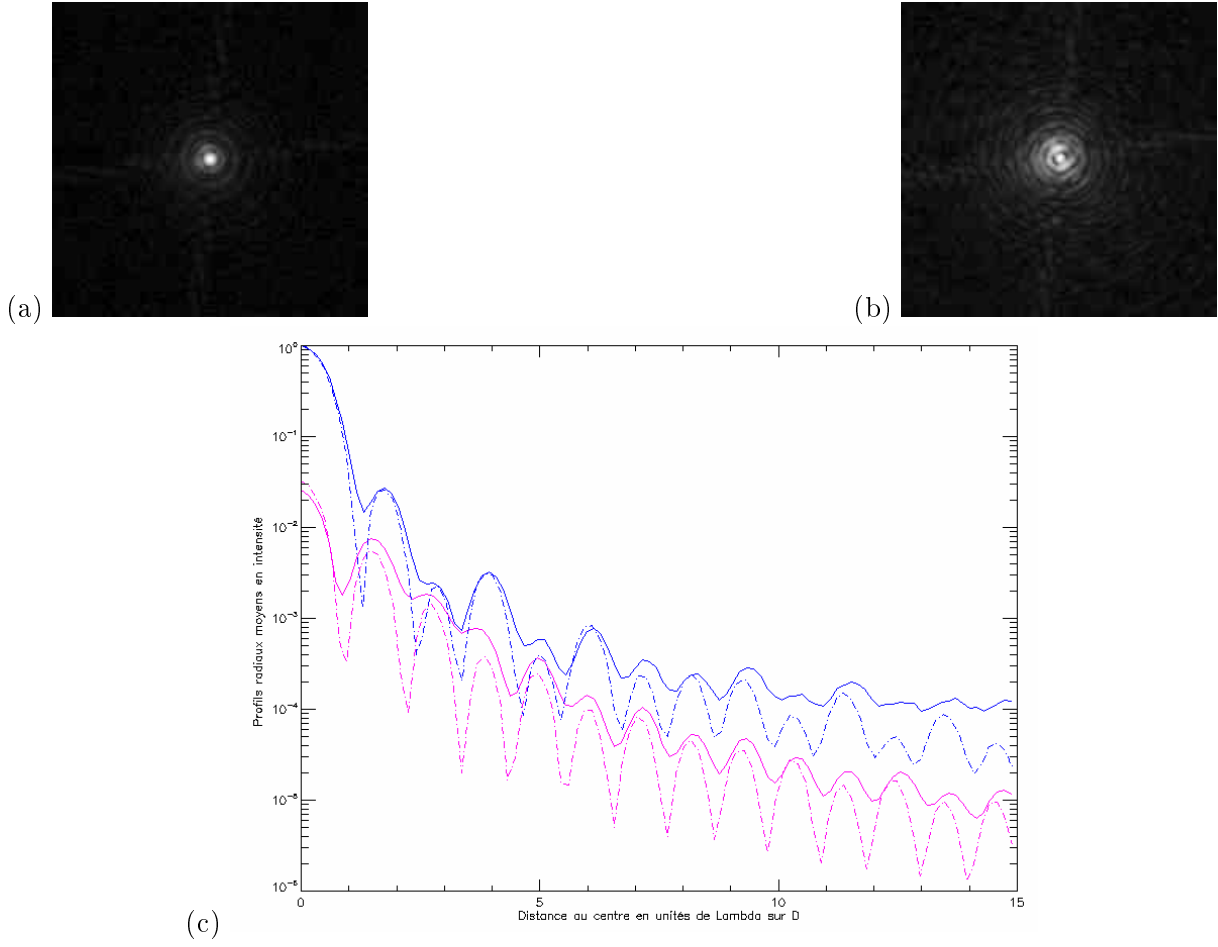


FIG. 4.14 – Coronographe de Lyot classique à $3\lambda/D$: (a) image de référence, (b) image coronographiée, (c) profils radiaux moyens correspondants (référence en bleu et corono en rose) auxquels se superposent les profils simulés en pointillés.

La table 4.8 recense les performances coronographiques obtenues.

	Expérience	Simulation
Extinction	41 ± 11	42
Réjection	13 ± 2	20

TAB. 4.8 – Inventaire des performances coronographiques du coronographe de Lyot classique à $3\lambda/D$ et comparaison avec les valeurs théoriques.

Ces résultats sont en accord avec les performances attendues. Nous pouvons ainsi attester de la bonne qualité du masque coronographique. Il faut noter que la dispersion des valeurs d'extinction obtenues peut s'expliquer par différentes stratégies de centrage du masque coronographique : obtenir une PSF coronographiée la plus symétrique possible conduit à des valeurs d'extinction légèrement plus faible que dans le cas où on désire obtenir la meilleure extinction possible.

4.2.3.2 Mesure des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$

L'apodiseur est introduit dans le plan pupille d'entrée et l'on réalise des acquisitions d'images de référence apodisées et coronographiées apodisées. La figure 4.15 montre les poses longues obtenues après sommation de 1000 poses courtes ($T_i=30\text{ms}$, densité de 6.5 pour les images de référence et de 4.6 pour les images coronographiées), ainsi que les profils radiaux moyens résultants comparés aux profils théoriques obtenus par simulation.

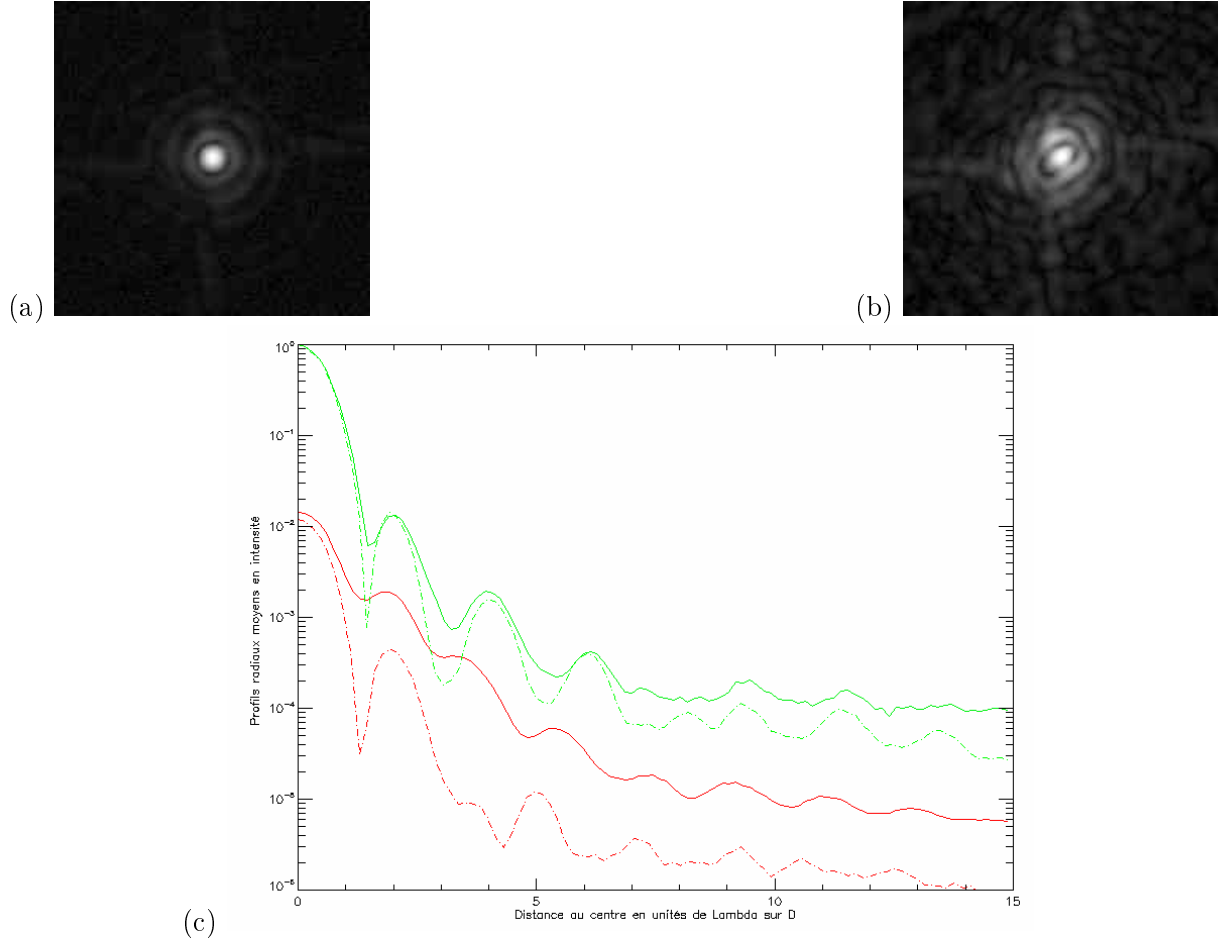


FIG. 4.15 – Coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$: (a) image de référence apodisée, (b) image coronographiée, (c) profils radiaux moyens correspondants (référence en vert et coronographié en rouge) auxquels se superposent les profils simulés en pointillés.

L'allure générale des PSF mesurées correspond aux simulations. Cependant, les niveaux d'intensité obtenus sont nettement inférieurs à ceux prévus : ceci est dû au fait que nous sommes limités par le manque de dynamique de la caméra. Plusieurs séries d'acquisitions ont été réalisées, la table 4.9 recense les performances coronagraphiques obtenues.

L'extinction est conforme aux attentes. Par contre, les valeurs de réjection obtenues sont très faibles : ceci est tout à fait conforme à ce que l'on peut voir sur les profils radiaux moyens puisque le profil coronographié mesuré est nettement au dessus du théorique. Par ailleurs, on voit bien ici que le critère de l'extinction n'est pas adéquat pour quantifier les performances du coronographe de Lyot apodisé.

	Expérience	Simulation
Extinction	71 ± 11	72
Réjection	24 ± 10	65

TAB. 4.9 – Inventaire des performances coronagraphiques du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ et comparaison avec les valeurs théoriques.

4.2.3.3 Comparaison des performances coronagraphiques Lyot classique - Lyot apodisé pour un masque coronagraphique à $3\lambda/D$

Il est aussi intéressant de tracer sur un même graphe les courbes obtenues en coronagraphie de Lyot classique et apodisée pour se rendre compte de l'apport de l'apodiseur. Ceci est représenté sur la figure 4.16. En comparant les PSF de référence avec et sans apodiseur, nous retrouvons les deux caractéristiques principales de l'apodisation : l'élargissement du pic central de la PSF ainsi qu'une perte de flux. La comparaison des PSF coronographiées montre bien la concentration de l'énergie lumineuse au centre de l'image permettant une diminution de l'énergie des anneaux secondaires. La table 4.10 compare les performances coronagraphiques. Bien que les mesures

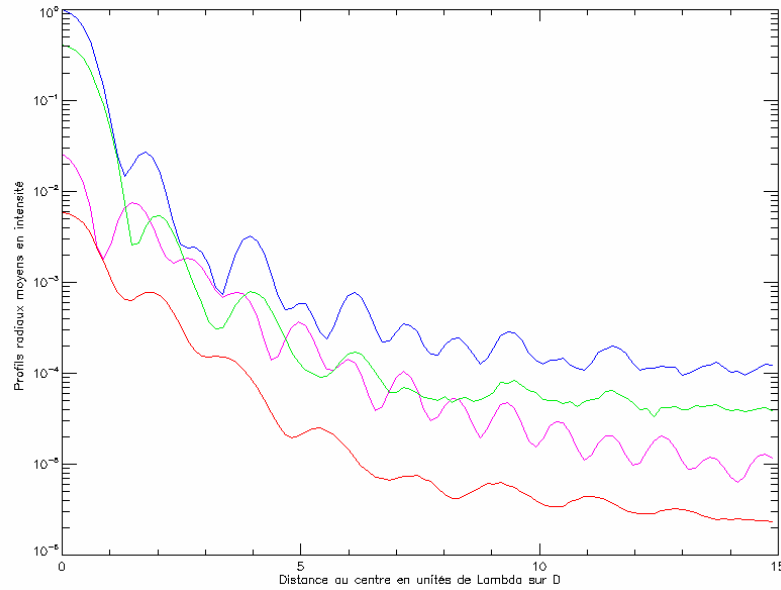


FIG. 4.16 – Comparaison CLC-ALC : profils radiaux moyens des PSF mesurées (bleu) de référence non apodisée, (vert) de référence apodisée, (rose) coronographiée non apodisée, (rouge) coronographiée apodisée.

soient limitées par la dynamique du détecteur, l'apodisation permet d'obtenir un gain d'un facteur 4 (5 en théorie) de l'extinction et d'un facteur 6 de la réjection (8 en théorie). Au niveau du contraste des PSF, l'apodiseur permet une réduction de deux décades des ailes de la PSF non coronographiée.

	Expérience	Simulation
Extinction Lyot classique	41	42
Extinction ALC (par rapport à la référence non apodisée)	172	202
Réjection Lyot classique	13	20
Réjection ALC (par rapport à la référence non apodisée)	77	157

TAB. 4.10 – Apport sur les performances coronagraphiques du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ par rapport au coronographe de Lyot classique et comparaison avec les valeurs théoriques.

4.2.4 Mesures de sensibilité au déplacement des composants de l'ALC $3\lambda/D$ en lumière monochromatique à $\lambda = 632.8$ nm

4.2.4.1 Mesure de sensibilité des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral de l'apodiseur

On déplace l'apodiseur latéralement en hauteur et l'on enregistre les poses longues coronographiées correspondantes. Les paramètres d'acquisitions sont : atténuation de 4.6 pour les images coronographiées et de 6.5 pour les images de référence apodisée, temps d'intégration de 30 ms, déplacements de 0 mm à 6 mm par pas de 1 mm. Le déplacement de l'apodiseur entraîne un déplacement de la position du maximum des images : afin de quantifier cet effet, il faut donc prendre soin d'imposer que le calcul des profils radiaux moyens soit effectué autour du même point de référence qui est dans ce cas le centre de la PSF de référence.

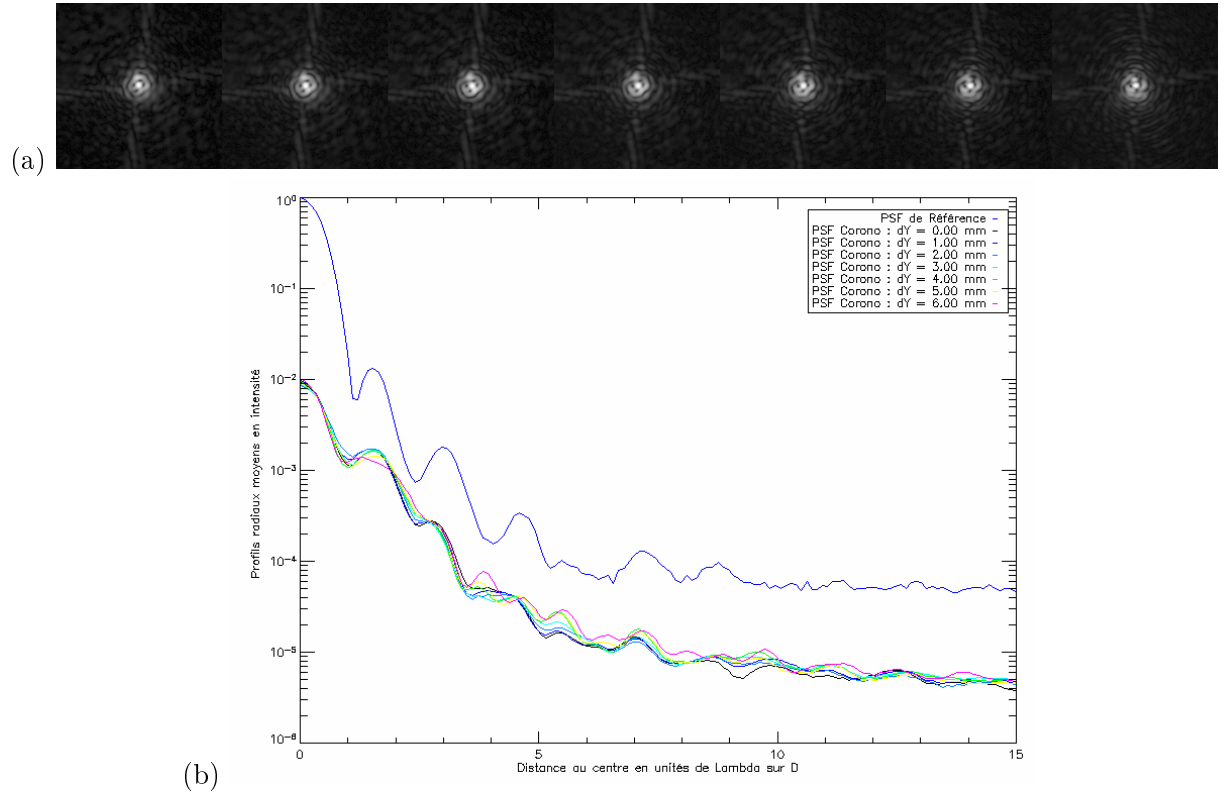


FIG. 4.17 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral de l'apodiseur : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.

Les vues 2D ainsi que les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont représentées sur la figure 4.17.

Nous constatons que pour des déplacements inférieurs à 6 mm, les profils sont quasi-superposés. La PSF obtenue pour un déplacement de 6 mm commence à présenter quelques distortions : écrasement et étalement du deuxième anneau, remontée d'intensité à 4, 5.5 et 7 λ/D . Malheureusement, il n'a pas été possible d'effectuer des déplacements de plus grande amplitude car la platine de translation arrivait en bout de course. J'ai pu néanmoins vérifier que l'on obtenait la même évolution lorsque l'on translate l'apodiseur de 0 mm à -6 mm par pas de 1 mm.

La faible sensibilité de l'ALC au déplacement latéral de l'apodiseur se confirme sur la figure 4.18 où, aux erreurs de mesures près, les évolutions de l'extinction et de la réjection relatives sont quasi-stationnaires.

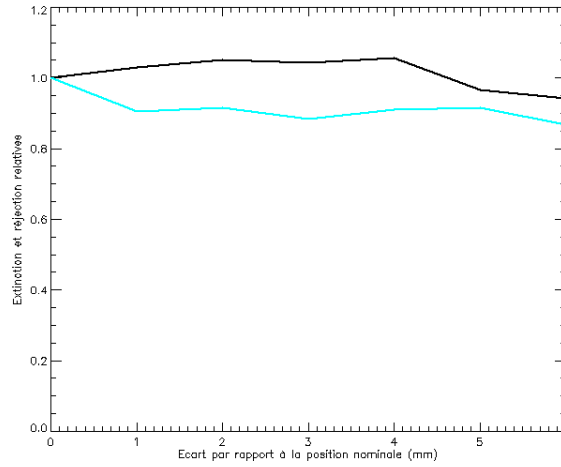


FIG. 4.18 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral de l'apodiseur : évolution (noir) de l'extinction et (bleu) de la réjection en fonction de la valeur du déplacement.

4.2.4.2 Mesure de sensibilité des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral du masque coronagraphique

On déplace le masque coronagraphique latéralement en hauteur et l'on enregistre les poses longues coronographiées correspondantes. Les paramètres d'acquisition sont donnés dans le tableau 4.11 ; les vues 2D ainsi que les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont représentés sur la figure 4.19.

	1	2	3	4	5	6	7
dY (mm)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
Densité	4	4	4	5	6	6	6
Ti (ms)	30.0	15.94	5.1	5.1	39.84	39.84	39.84

TAB. 4.11 – Paramètres d'acquisition des différents déplacements du masque coronagraphique effectués : valeur du déplacement par rapport à la position nominale, valeur de la densité neutre placée derrière la source, temps d'intégration.

Pour cette mesure, il faut s'assurer avant toute acquisition que le centrage du masque coronographique suivant l'horizontale n'ait pas bougé d'une pose à l'autre et régler la position de la vis micrométrique si nécessaire.

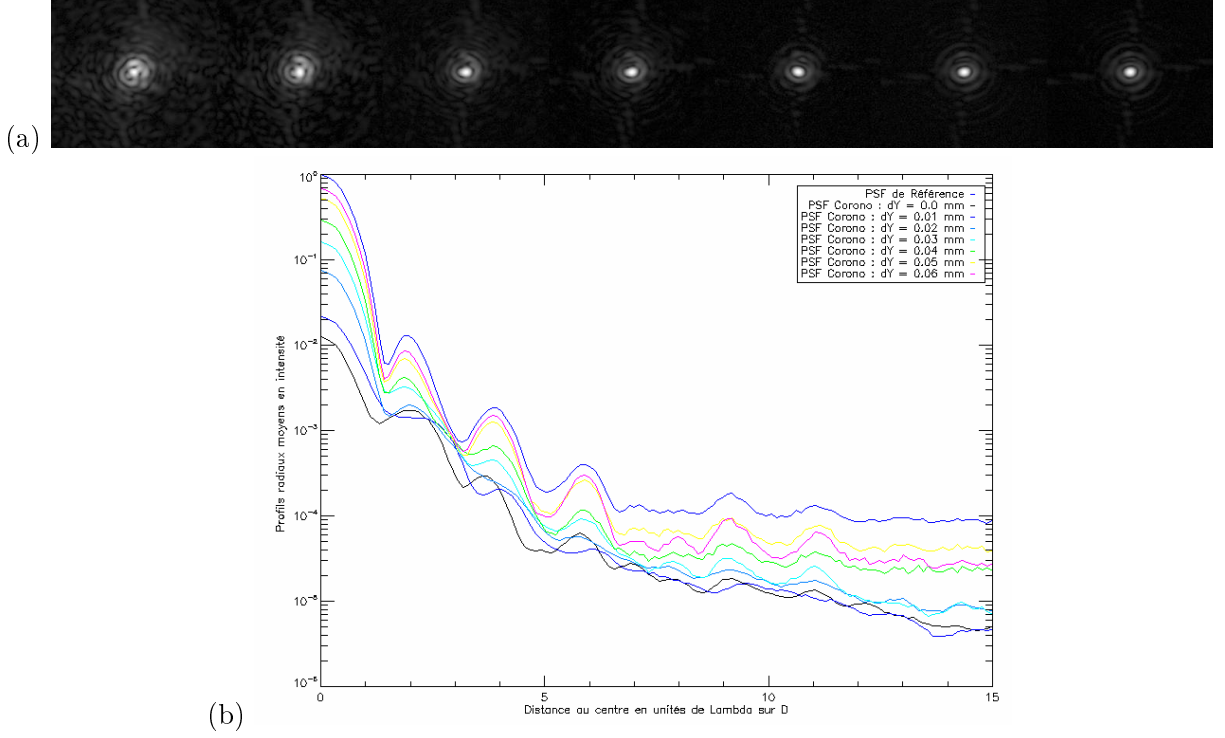


FIG. 4.19 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du masque coronographique : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.

Comme escompté, le centrage du masque coronographique est déterminant sur les performances de l'ALC : plus le masque est décentré, moins le centre de la PSF est intercepté et plus les ailes de la PSF remontent en intensité et se rapprochent de la PSF non coronographiée.

La figure 4.20 confirme cet effet où les évolutions de l'extinction et de la réjection relatives se dégradent fortement dès le premier décentrage.

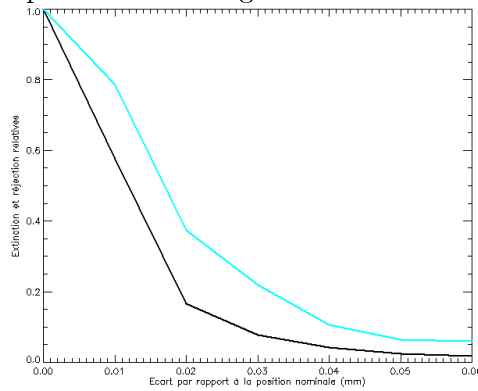


FIG. 4.20 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du masque coronographique : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.

4.2.4.3 Mesure de sensibilité des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ au déplacement latéral du Lyot Stop

Le diaphragme de Lyot est déplacé horizontalement et l'on enregistre les poses longues coronographiées correspondantes. Les paramètres d'acquisition sont : atténuation de 4.6 pour les images coronographiées et de 6.5 pour les images de référence apodisées, déplacements de 0 à 0.16 mm par pas de 0.02 mm. Les vues 2D et les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont représentées sur la figure 4.21.

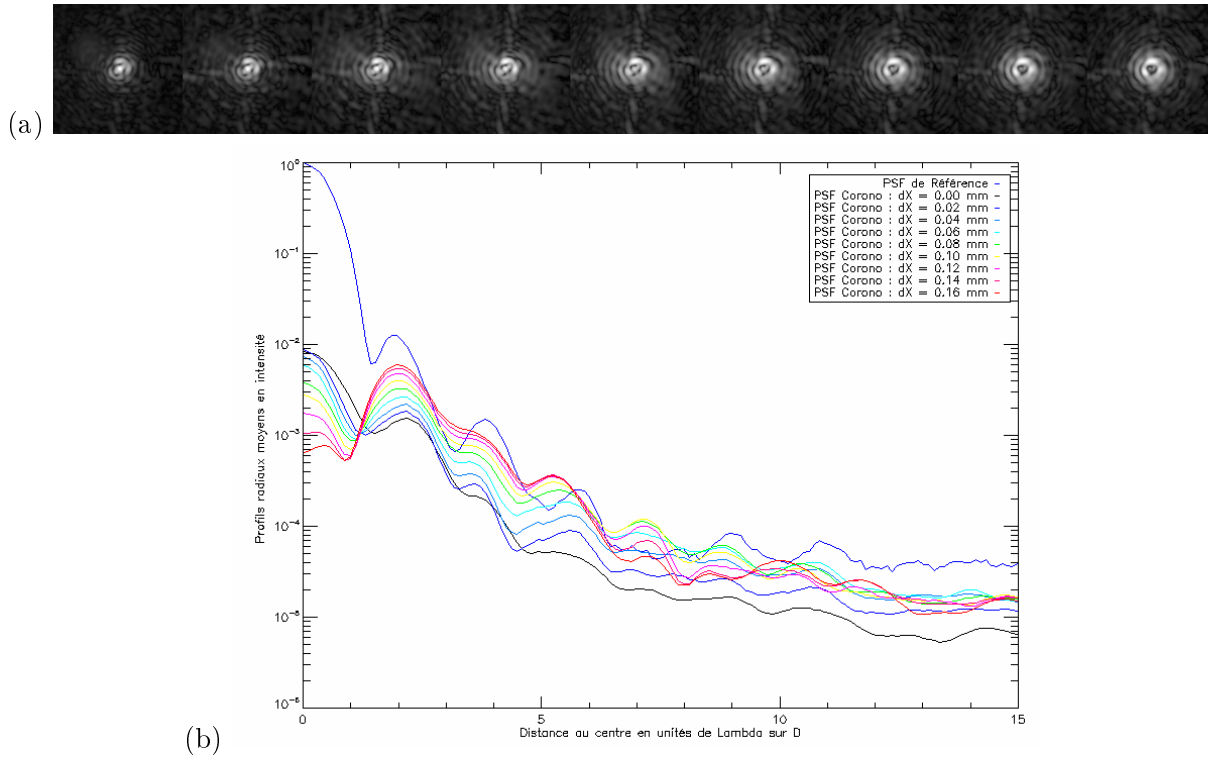


FIG. 4.21 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du Lyot stop : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.

On peut comprendre cette séquence de la façon suivante : lors du déplacement latéral du Lyot stop, il y a réinjection d'énergie lumineuse dans la pupille notamment au niveau de l'obstruction centrale et des araignées qui coïncident de moins en moins avec ceux du masque pupillaire. Au niveau des PSF, cet effet se traduit par une diminution de l'intensité du pic central (ce qui va provoquer une dégradation de l'extinction) au profil des deuxième, troisième et quatrième anneaux qui tendent à ne faire plus qu'un. A une plus grande distance du centre, le niveau moyen des ailes de la PSF augmente pour se rapprocher de plus en plus de celui de la PSF de référence.

Sur la figure 4.22, l'effet du déplacement du Lyot stop se traduit par une amélioration de l'extinction et une dégradation de la réjection. Dans ce cas, les limitations de ces deux critères pour estimer les performances coronagraphiques apparaissent. Si l'on juge en termes de contraste de PSF, celle correspondant au déplacement de 0.04 mm constitue la limite acceptable.

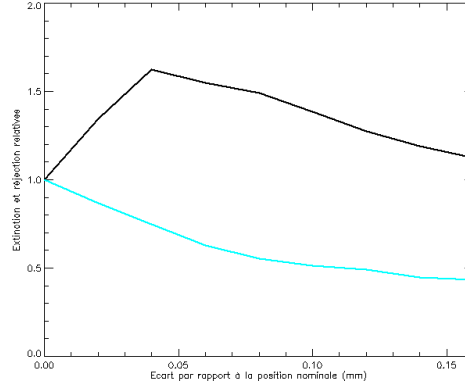


FIG. 4.22 – Sensibilité de l'ALC au déplacement latéral du Lyot stop : évolution de l'extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.

4.2.4.4 Mesure de sensibilité des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ à la défocalisation de l'apodiseur

On défocalise l'apodiseur et l'on enregistre les poses longues coronographiées correspondantes. Les paramètres d'acquisitions sont : atténuation de 4.6 pour les images coronographiées et de 6.5 pour les images de référence apodisées, temps d'intégration de 30 ms, déplacements de 0 mm à 5 mm par pas de 1 mm. Les vues 2D ainsi que les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont visibles sur la figure 4.23.

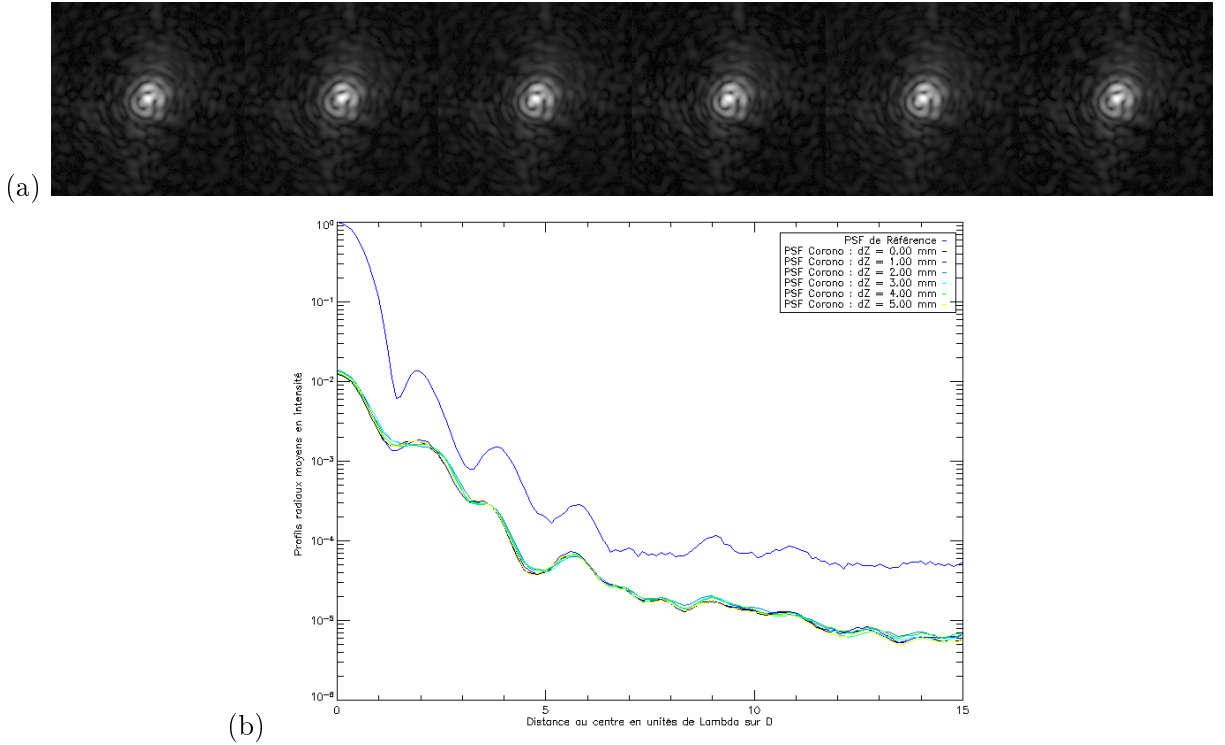


FIG. 4.23 – Sensibilité de l'ALC à la défocalisation de l'apodiseur : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.

Nous constatons que, quel que soit le déplacement, les profils sont quasi-superposés.

La faible sensibilité de l'ALC au défocus de l'apodiseur se retrouve sur la figure 4.24 où, aux erreurs de mesures près, les évolutions de l'extinction et de la réjection relatives sont quasi-stationnaires.

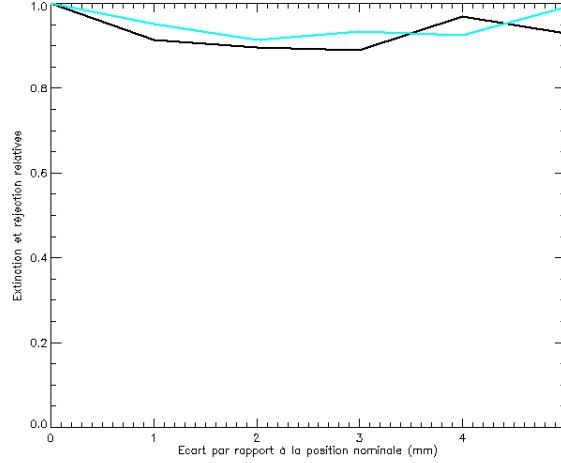


FIG. 4.24 – Sensibilité de l'ALC à la défocalisation de l'apodiseur : évolution (noir) de l'extinction et (bleu) de la réjection en fonction de la valeur du déplacement.

4.2.4.5 Mesure de sensibilité des performances coronagraphiques de l'ALC $3\lambda/D$ à la défocalisation du masque coronagraphique

On défocalise le masque coronagraphique et l'on enregistre les poses longues coronographiées correspondantes. Les paramètres d'acquisitions sont : atténuation de 4.6 pour les images coronographiées et de 6.5 pour les images de référence apodisée, temps d'intégration de 30 ms, déplacements de 0 mm à 2 mm par pas de 0.25 mm. Les vues 2D ainsi que les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont visibles sur la figure 4.25.

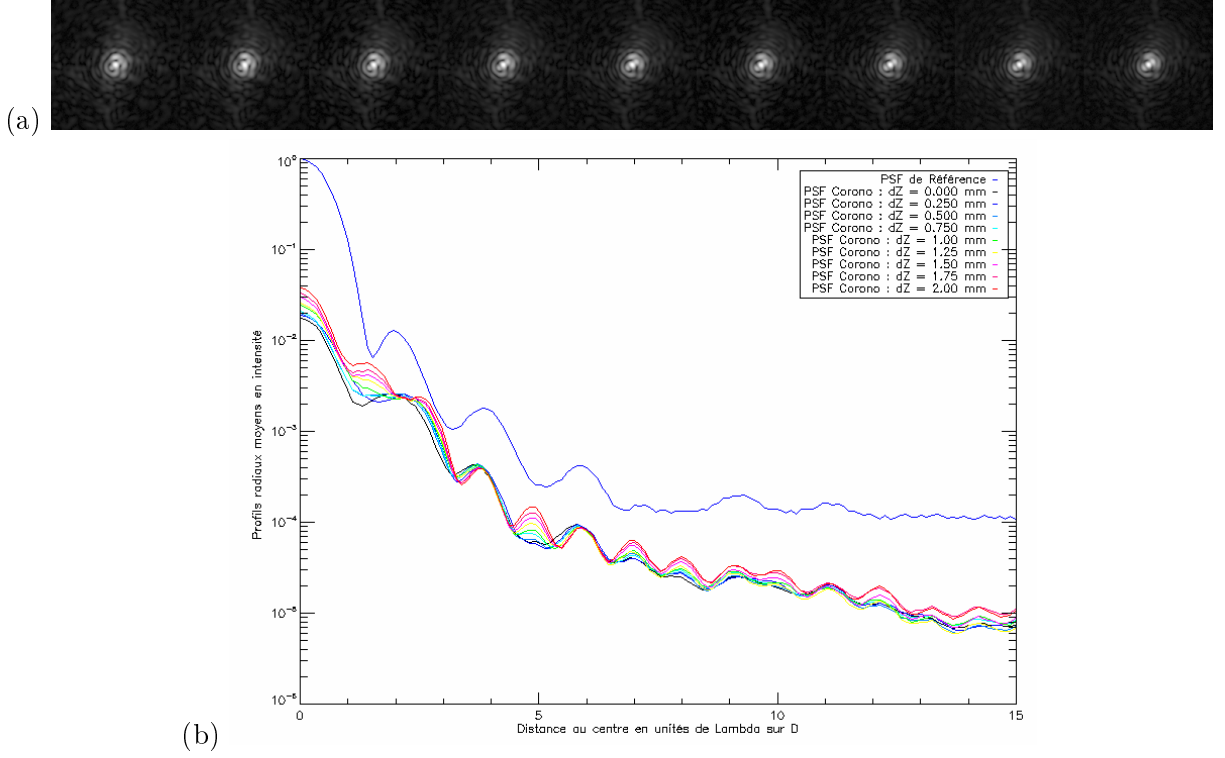


FIG. 4.25 – Sensibilité de l’ALC à la défocalisation du masque coronographique : (a) vue 2D des PSF coronographiées par valeur de déplacement croissante, (b) profils radiaux moyens correspondants.

L’augmentation de la défocalisation se traduit sur les PSF de trois manières différentes : l’intensité du pic central augmente, la position du deuxième anneau se décale se rapproche du premier et il apparaît un anneau supplémentaire à $5\lambda/D$ du centre.

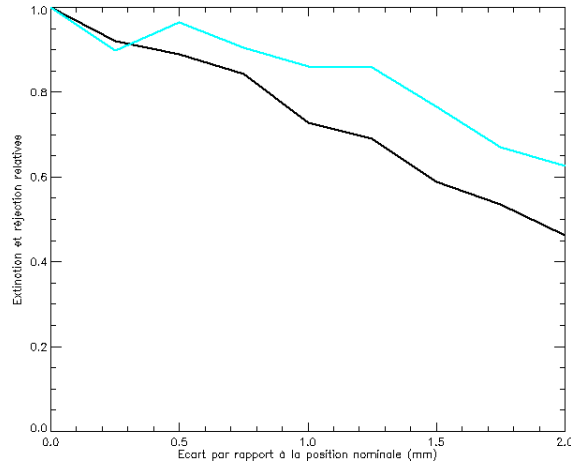


FIG. 4.26 – Sensibilité de l’ALC à la défocalisation du masque coronographique : évolution de l’extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.

Sur la figure 4.26, on peut voir une diminution progressive des performances coronographiques correspondantes.

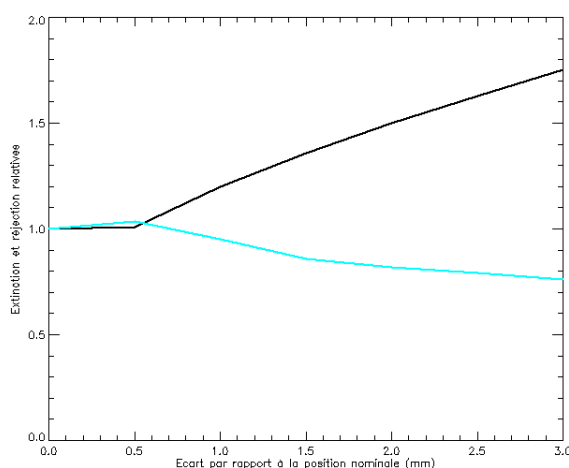


FIG. 4.28 – Sensibilité de l’ALC à la défocalisation du Lyot stop : évolution de l’extinction (noir) et de la réjection (bleu) en fonction de la valeur du déplacement.

4.2.4.7 Tolérances sur le positionnement des composants de l’ALC $3\lambda/D$ visible

A partir des résultats de mesure obtenus précédemment, il est possible d’estimer les valeurs du tolérancement en positions des différents composants de l’ALC. Ces estimées de tolérances sont données dans la table 4.12.

Composant	Tolérance latérale	Tolérance longitudinale
Apodiseur	± 5 mm	≥ 5 mm
Masque coronographique	≤ 0.01 mm	± 1 mm
Lyot stop	± 0.04 mm	± 0.5 mm

TAB. 4.12 – Inventaire des tolérances en position des composants du coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$.

Le critère de détermination de la limite de tolérance a été défini au cas par cas suivant le déplacement considéré : il peut s’agir de l’évolution de l’extinction, de la réjection et/ou du contraste local des PSF.

4.2.5 Mesure de la transmission de l'apodiseur en bande étroite dans le domaine visible

Pour effectuer cette mesure, on utilise le même protocole expérimental que dans la section 4.2.2 et l'on change le filtre spectral placé devant la source blanche. La table 4.13 recense les filtres spectraux disponibles qui ont été utilisés.

Numéro du filtre	λ_c (nm)	λ_{min} (nm)	λ_{max} (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
1	421.5	412	431	19
2	432.5	425	440	15
3	445	433	457	24
4	485	475	495	20
5	513.5	502	525	23
6	535.5	525	546	21
7	550	535	565	30
8	545	535	555	20
9	558	547	569	22
10	563.5	552	575	23
11	574	565	583	18
12	584.5	569	600	31
13	603.5	587	620	33
14	661	652	670	28
15	700.5	689	712	23

TAB. 4.13 – Inventaire des filtres spectraux utilisés.

La figure 4.29 montre l'évolution spectrale de la transmission de l'apodiseur obtenue comparée à la courbe théorique qui a été déterminée à partir du code de calcul qui a été présenté au chapitre 3. La mesure pour les deux premiers filtres est entachée de biais par un flux trop faible au niveau du détecteur.

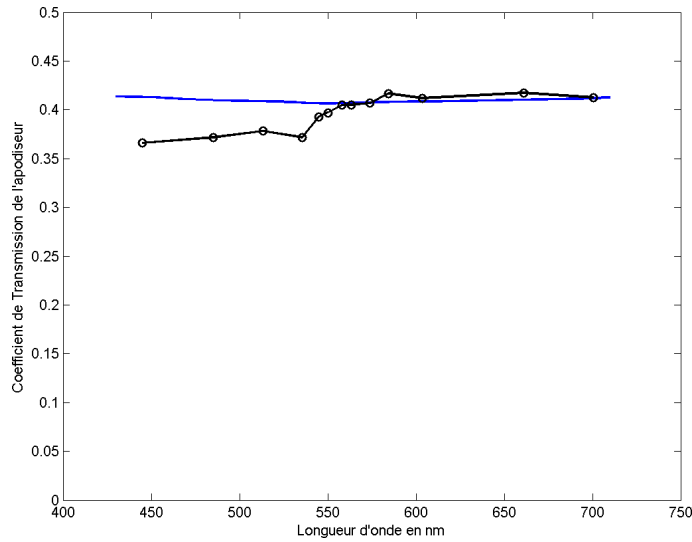


FIG. 4.29 – Mesure du coefficient de transmission de l'apodiseur (noir) comparée à la simulation numérique (bleu).

Hormis pour les quatre premiers filtres, la courbe mesurée est en adéquation avec la simulation numérique. Ce résultat valide la méthode de calcul théorique utilisée.

Nous pouvons conclure que sur le domaine de longueur d'onde $[450 \text{ nm} - 700 \text{ nm}]$, le coefficient de transmission de l'apodiseur vaut $39 \pm 3\%$.

4.2.6 Mesure de la réflexion de l'apodiseur en bande étroite dans le domaine visible

Le schéma de principe réalisé pour effectuer la mesure de réflectivité de l'apodiseur est représenté sur la figure 4.30.

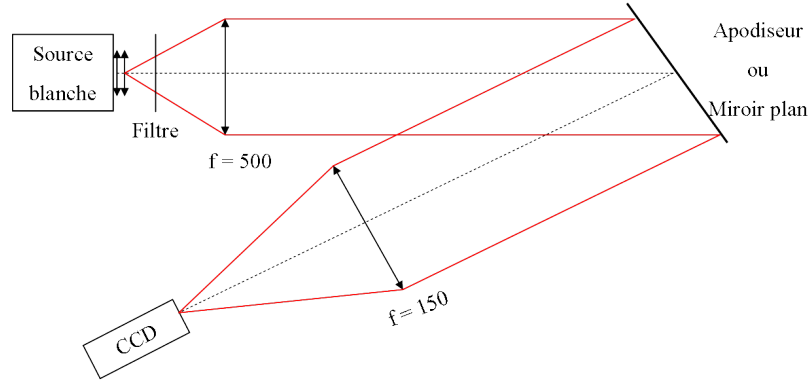


FIG. 4.30 – Schéma de principe de la mesure de réflectivité de l'apodiseur.

L'apodiseur est légèrement incliné par rapport à l'axe optique afin de générer un faisceau réfléchi suffisamment distinct du faisceau incident pour pouvoir être imagé sur la caméra CCD. Pour obtenir une mesure de référence, l'apodiseur est remplacé par un miroir plan en aluminium dont le coefficient de réflexion vaut 90%.

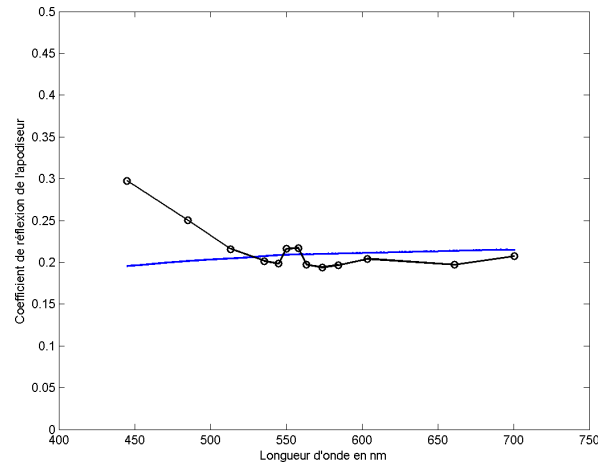


FIG. 4.31 – Mesure du coefficient de réflexion de l'apodiseur (noir) et comparaison avec la simulation numérique (bleu).

La figure 4.31 montre la courbe obtenue comparée comme précédemment à la courbe théorique simulée. Il n'a pas été possible d'obtenir des données exploitables pour les filtres 1 et 2 en raison d'un flux trop faible.

Hormis pour les deux premiers points, la courbe mesurée est en adéquation avec la simulation numérique. On conclut que sur le domaine de longueur d'onde [450 nm - 700 nm], le coefficient de réflexion de l'apodiseur vaut $21 \pm 1\%$.

4.3 Conclusion concernant l'étude expérimentale du coronographe de Lyot apodisé $3\lambda/D$ dans le visible

Je viens de présenter les résultats de caractérisation expérimentale d'un coronographe de Lyot apodisé $3\lambda/D$ dans le visible. Différents types de mesures ont été effectuées, je les rappelle ci-dessous et présente les conclusions principales qu'elles ont permis de tirer :

- Caractérisation de l'apodiseur :
 1. profil radial en transmission hors spécification dans les régions où r vaut [4.8 mm - 6 mm] et [8.8 mm - 11 mm], bien que le dépôt ne présente pas de discontinuités majeures.
 2. coefficient de transmission global dans le domaine spectral [450 nm - 700 nm] : 39%.
 3. coefficient de réflexion global dans le domaine spectral [450 nm - 700 nm] : 21%.
- Caractérisation du masque coronographique : les PSF et les performances coronographiques obtenues expérimentalement du coronographe de Lyot classique $3\lambda/D$ corroborent les simulations numériques.
- Performances coronographiques de l'ALC $3\lambda/D$: l'allure générale des PSF et l'extinction sont en accord avec les simulations; par contre la faible dynamique du détecteur CCD limite fortement la réjection et la dynamique des PSF.
- Estimation de la sensibilité des performances de l'ALC en fonction des déplacements longitudinaux et latéraux de ces composants : sensibilité importante aux déplacements latéraux du masque coronographique et du Lyot stop ainsi qu'au défocus du Lyot stop.

Par ailleurs, ce travail a été présenté sous forme d'un poster intitulé "Apodized Lyot coronagraph for the VLT instrument SPHERE : laboratory tests and performances of a first prototype in the visible" lors de la conférence SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008" qui s'est tenue à Marseille du 23 au 28 Juin 2008. L'article correspondant est présenté en annexe.

Chapitre 5

Etude numérique du coronographe de Lyot apodisé pour l'instrument SPHERE du VLT

5.1 Introduction

Ce chapitre recense les études numériques qui ont été faites en début de phase B du projet SPHERE/VLT en utilisant le software package SPHERE pour le système CAOS (Carillet et al. [32]) afin de dimensionner le prototype de l'ALC infrarouge dont les tests en laboratoire seront présentés au chapitre 6. Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- déterminer la forme d'apodiseur optimale répondant au mieux aux spécifications de l'instrument,
- définir les tolérances sur le profil en transmission de l'apodiseur pour sa fabrication,
- définir les tolérances sur le positionnement des composants de l'ALC afin de prévoir la mécanique adéquate pour son intégration dans SPHERE,
- étudier l'effet des reflets parasites introduits par l'apodiseur,
- étudier l'influence de l'erreur sur le front d'onde introduite par l'apodiseur affectant les performances de l'ALC.

Tout ceci conduit à simuler au mieux les performances attendues du prototype.

5.2 Spécifications requises par SPHERE pour la coronographie

Plusieurs conditions sont requises pour les coronographes de SPHERE en termes de performance et de spécifications techniques afin d'atteindre les objectifs astrophysiques définis par le consortium scientifique de l'instrument. La Table 5.1 résume ces spécifications. Parmi celles-ci on retiendra la contrainte principale qui est l'important contraste à obtenir pour une grande proximité de l'étoile centrale sans dégrader la résolution obtenue avec un télescope de 8m et ceci sur un large domaine spectral ($[0.95\,\mu\text{m} - 2.32\,\mu\text{m}]$).

5.3 Calcul des profils des apodiseurs pour l'ALC IR de SPHERE

Le calcul des profils en transmission des apodiseurs optimaux pour différents diamètres angulaires du masque coronographique a été effectué par Marcel Carillet selon l'algorithme présenté à la section 2.5. Pour réaliser cette optimisation, il a été choisi d'effectuer le calcul pour la longueur d'onde centrale de la bande spectrale prioritaire de SPHERE, la bande H, puis de vérifier

Paramètre	Valeur
Rapport d'ouverture	F/40
Couverture spectrale totale	YJHKs $0.95 \mu\text{m}$ - $2.32 \mu\text{m}$
Couverture spectrale en mode différentiel	YJH $0.95 \mu\text{m}$ - $1.8 \mu\text{m}$
FOV	$12.5 \text{ arcsec} * 12.5 \text{ arcsec}$
Atténuation du pic de la PSF	> 100 en bandes JH (objectif 400) 50 en bande Y (objectif 200)
Gain en contraste de PSF	5 – 10 aux bandes JH 2 en bande Y
Inner Working Angle	< 0.1 arcsec
Transmission hors-axe (incluant le Lyot stop)	0.2 à 0.1 arcsec (objectif 0.5) 0.4 à 0.5 arcsec (objectif 0.7)

TAB. 5.1 – Spécifications requises pour la coronagraphie par l'instrument SPHERE.

si les performances coronagraphiques ne se dégradait pas trop aux autres longueurs d'onde. La figure 5.1 présente les profils obtenus pour des diamètres de masque coronagraphique allant de $3\lambda/D$ à $5\lambda/D$.

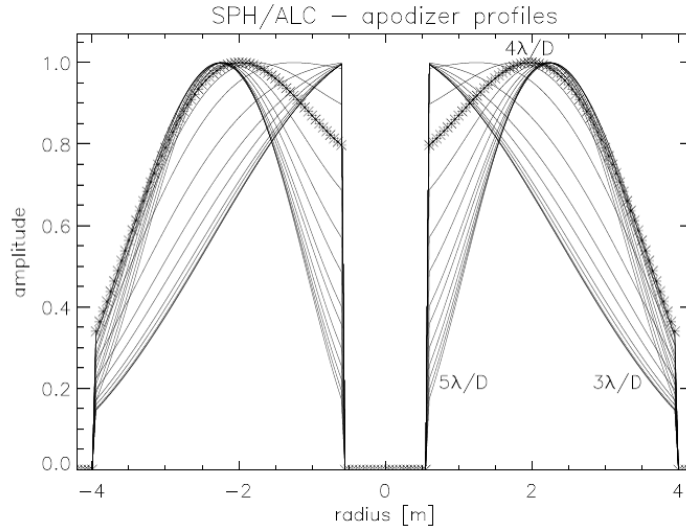


FIG. 5.1 – Profils en transmission d'apodiseurs calculés pour différents diamètres angulaires de masques coronagraphiques allant de $3\lambda/D$ à $5\lambda/D$ par pas de $0.1\lambda/D$. L'apodiseur calculé pour le masque $4\lambda/D$ est mis en évidence par les croix.

On retrouve sur cette figure ce qui avait été énoncé par Soummer [99] : pour des petits diamètres du masque coronagraphique, le profil en transmission de l'apodiseur optimal a la forme d'une cloche tandis qu'il ressemble à un bagel (ou un anneau) pour des masques coronagraphiques plus larges.

Par ailleurs, si, pour choisir le diamètre angulaire du masque coronagraphique et son apodiseur associé, le critère utilisé est celui du maximum de transmission du coronographe, on s'aperçoit d'après cette figure que le meilleur couple apodiseur - masque coronagraphique satisfaisant ce critère est l'apodiseur optimisé pour un masque coronagraphique de $4\lambda/D$.

Le progiciel CAOS-SPHERE, l'outil de simulation de l'instrument SPHERE :

Le Software Package CAOS-SPHERE, ensemble de routines et de blocs dédiés aux simulations numériques de l'instrument SPHERE, est développé depuis 2006 par Marcel Carbillet et Anthony Boccaletti [28] dans le cadre du Workpackage Simulation.

Le Software package SPHERE est composé de plusieurs modules représentatifs du concept instrumental qui sont les suivants :

- **AOC** (Adaptive Optics Code) : ce module génère des aberrations de front d'onde aléatoires qui sont des résidus de la turbulence atmosphérique et du jitter instrumental pour l'étoile cible et l'étoile de référence après correction par le système d'optique adaptative. On obtient en sortie de ce module, un tableau de 256x256 pixels correspondant à l'écran de phase d'erreur de front d'onde (exprimée en mètres) à la fois pour l'étoile cible et l'étoile de référence.
- **COP** (Common Optical Path) : ce module génère les aberrations statiques localisées en amont des optiques des coronographes qu'elles soient communes ou différentielles. En sortie, un écran de phase de 256x256 pixels correspondant à l'erreur de front d'onde produite est généré à la fois pour l'étoile cible et l'étoile de référence.
- **IRD** (IRDis modeling) : ce module modélise le sous-instrument IRDIS et génère des images coronographiées pour des objets sur l'axe (l'étoile cible et l'étoile de référence) et des objets hors-axe (des planètes). Ce module produit en sortie des cartes d'intensité pour les objets situés sur et hors de l'axe.
- **IFS** (IFS modeling) : ce module modélise l'IFS et partage le code similaire avec le module IRD. La structure de sortie est identique à celle d'IRD à la seule différence que les tableaux sont de 1522x1522 pixels au lieu de 1024x1024 pixels.
- **ZIM** (ZIMpol modeling) : ce module simule le sous-instrument ZIMPOL et partage le code similaire avec le module IRD.
- **WID** (Write Image Data) : ce module permet de sauvegarder les données sur le disque pour un usage ultérieur. Les données sont sauvegardées dans une structure contenant : les PSF sur l'axe (pour l'objet et l'étoile de référence), les PSF hors-axe (des planètes), la taille du pixel, les longueurs d'onde centrale des PSF, les largeurs spectrales des PSF ainsi qu'un vecteur contenant les séparations des planètes.
- **DDT** (Display DaTa) : il s'agit du module de visualisation des données. Deux type de données d'entrée/sortie utilisées dans le Software package SPHERE peuvent être visualisées : des images et des fronts d'onde.

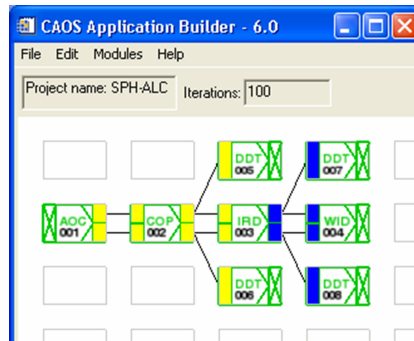


FIG. 5.3 – Interface graphique de simulation sous CAOS de l'instrument SPHERE, exemple de simulation du module IRDIS.

5.4. L'outil de simulation de l'instrument SPHERE/VLT : le Software Package CAOS-SPHERE

Ces modules sont combinés ensemble pour construire un projet comme illustré par la figure 5.3. Il faut noter que la présence d'au moins un module d'imagerie (IRD, IFS ou ZIM) est requise pour qu'un projet puisse être compilé. En complément à ce Software package, des routines IDL autonomes permettent d'effectuer des calculs de rapport signal à bruit ou des estimations de contraste.

Description détaillée des modules du Software Package CAOS-SPHERE que j'ai utilisés :

Dans le cadre de l'étude de l'ALC de SPHERE, j'ai été amenée à simuler l'imageur différentiel IRDIS. La structure générale du modèle de simulation du sous-instrument IRDIS est décrite sur la figure 5.4. Le schéma de simulation sous CAOS de l'imageur IRDIS est représenté sur la

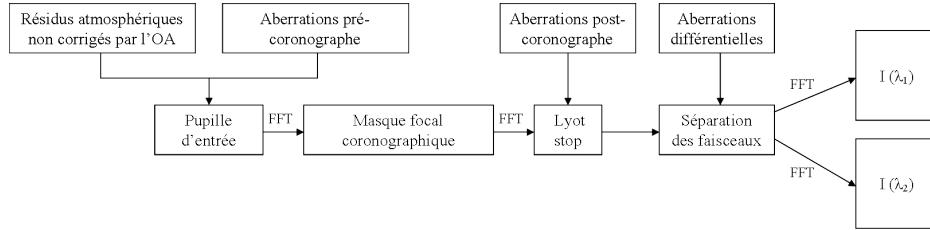


FIG. 5.4 – Structure générale du modèle de simulation de l'imageur différentiel IRDIS de l'instrument SPHERE/VLT.

figure 5.3 : les modules AOC, COP et IRD sont requis. Afin de bien comprendre les résultats des simulations présentés dans les sections suivantes, je présente ci après les détails de ces modules :

AOC

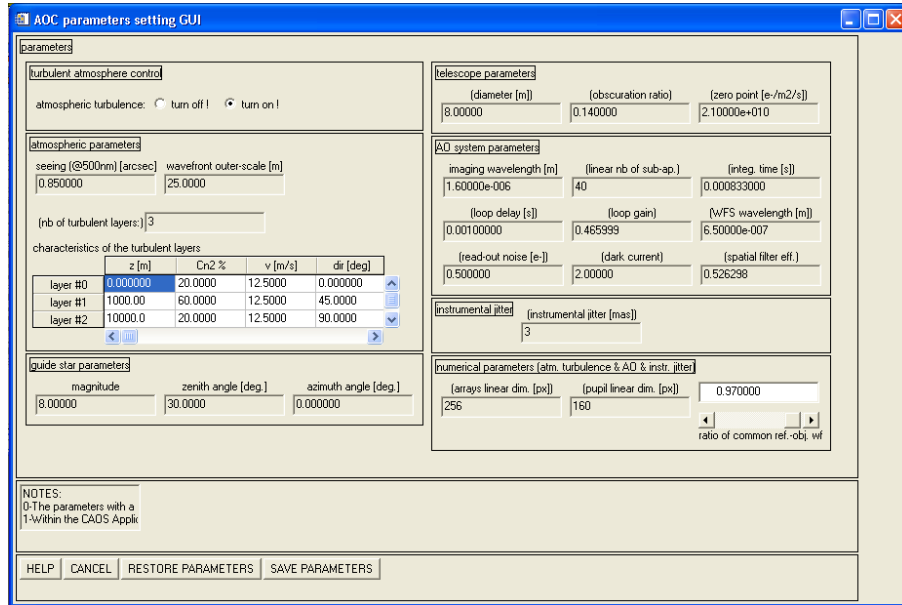


FIG. 5.5 – Interface graphique du module AOC du simulateur CAOS-SPHERE ; les paramètres entre parenthèses ne peuvent être modifiés.

Paramètres d'entrée :

La figure 5.5 présente l'interface graphique de paramétrisation du module AOC. Les paramètres modifiables sont :

- la possibilité d'effectuer des simulations avec ou sans atmosphère turbulente.
- les paramètres du télescope : diamètre, obstruction centrale.
- les paramètres atmosphériques : seeing, échelle externe de cohérence du front d'onde, caractéristiques des couches turbulentes.
- les caractéristiques de l'étoile guide : magnitude, angles zénithal et azimuthal.
- les paramètres de l'OA qui sont les plus importants de ce module puisqu'ils déterminent les performances de la correction et de ce fait l'ampleur des résidus : longueur d'onde d'imagerie et d'analyse, nombre de sous-pupilles, caractéristiques de la boucle.
- la possibilité d'ajouter du jitter instrumental.

La table 5.2 présente le format et les valeurs par défauts de ces paramètres.

Paramètre	Format	Valeur par défaut
Contrôle de l'atmosphère	"on" ou "off" pour shunter l'atmosphère	on
Seeing	arcsec	0.85"
Echelle externe	m	25m
Paramètres des couches	non accessible	-
Magnitude stellaire	pour la bande V	8
Angle zénithal	°	30°
Angle azimuthal	°	0°
Paramètres du télescope	non accessible	-
Longueur d'onde d'imagerie	m	$1.6 \cdot 10^{-6}$ m
Autre paramètres de l'OA	non accessible	-
Jitter instrumental	mas	3 mas
Taille des tableaux	non accessible	-

TAB. 5.2 – Format des paramètres d'entrée du module AOC de CAOS-SPHERE.

Contenu et résultat de la simulation : AOC fournit l'erreur de front d'onde résiduelle (en mètres) après correction par le système d'OA. Le calcul est basé sur l'estimation de plusieurs termes d'erreur qui sont modélisés par des densités spectrales de puissance. A chaque itération, un écran de phase aléatoire de 256x256 pixels est généré à la fois pour l'étoile objet et l'étoile de référence et est ajouté aux précédents.

COP

Paramètres d'entrée : La figure 5.6 présente l'interface graphique de paramétrisation du module COP. Les éléments paramétrables sont :

- Les cartes des aberrations introduites par les miroirs M1, M2 et M3 du télescope ; dans celles-ci les basses fréquences ont été retirées afin de prendre en compte le filtrage réalisé par l'OA.
- Les aberrations statiques : aberrations statiques de l'instrument, calibration de l'OA, propagation de Fresnel et effet d'un décalage latéral du faisceau optique. Elles sont identiques pour les étoiles de référence et de science.
- Les aberrations différentielles temporelles : défocus, désalignement et rotation de la pupille du télescope par rapport à celle de l'instrument, rotation et décalage différentiels du faisceau. Ces erreurs additionnelles de front d'onde sont considérées pour l'étoile de référence

5.4. L'outil de simulation de l'instrument SPHERE/VLT : le Software Package CAOS-SPHERE

et peuvent être introduites par exemple par des flexions mécaniques lors du pointage du télescope. Les aberrations chromatiques différentielles sont, quant à elles, calibrées dans le module IRD.

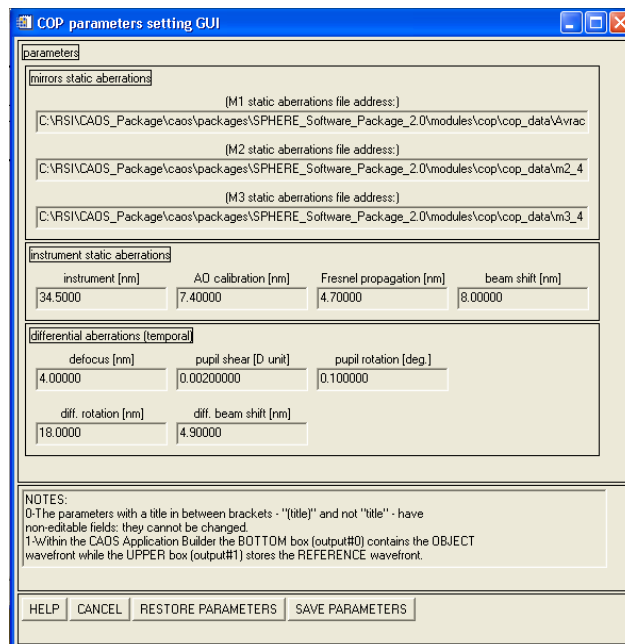


FIG. 5.6 – Interface graphique du module COP du simulateur CAOS-SPHERE.

La table 5.3 présente le format et les valeurs par défaut de ces paramètres.

Paramètre	Format	Valeur par défaut
Carte de phase de M1	fichier FITS de 256x256 pixels	Carte du M1 de l'UT4
Carte de phase de M2	fichier FITS de 256x256 pixels	Carte du M2 de l'UT4
Carte de phase de M3	fichier FITS de 256x256 pixels	Carte du M3 de l'UT4
Aberrations instrumentales	nm	34.5 nm
Calibration de l'OA	nm	7.4 nm
Propagation de Fresnel	nm	4.7 nm
Décalage de faisceau	nm	8 nm
Defocus	4 nm pour 1°C	4 nm
Pupil shear	en fraction de la taille de la pupille	0.02
Rotation de pupille	°	0.1°
Rotation différentielle	nm	18 nm
Décalage différentiel du faisceau	nm	4.9 nm

TAB. 5.3 – Format des paramètres d'entrée du module COP de CAOS-SPHERE.

Contenu et résultat de la simulation : Les fronts d'onde d'entrée sont fournis par le module AOC. Comme pour AOC, les écrans de phase sont obtenus suivant une modélisation de densité spectrale de puissance. A chaque itération, un écran de phase aléatoire de 256x256 pixels est généré à la fois pour l'étoile objet et l'étoile de référence et est ajouté aux précédents.

IRD

Paramètres d'entrée : La figure 5.7 représente l'interface graphique de paramétrisation du module IRD.

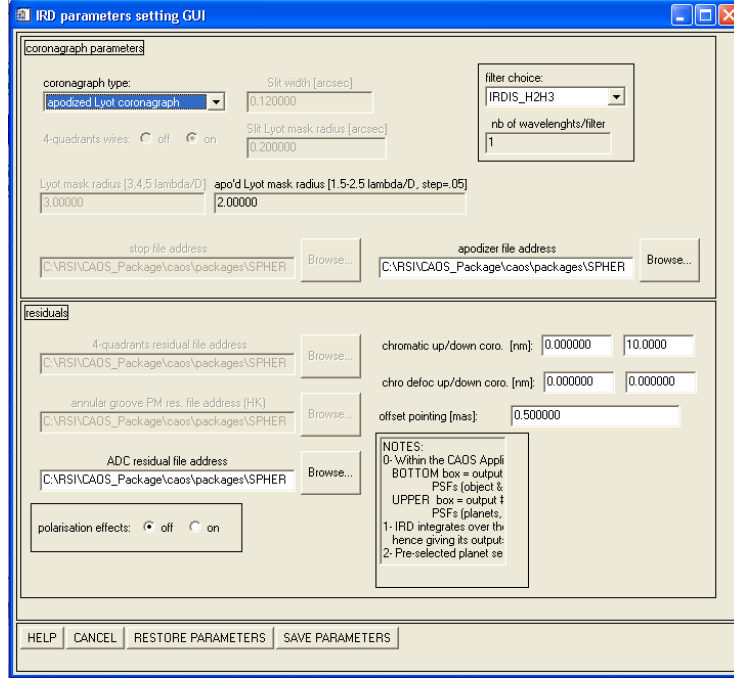


FIG. 5.7 – Interface graphique du module IRD du simulateur CAOS-SPHERE.

Les paramètres à définir sont :

- Les filtres spectraux d'observation : il peut s'agir de filtres différentiels (H2H3 par exemple) ou de filtres large bande. Les caractéristiques de ces filtres sont données dans la table 5.4. Le nombre de longueur d'onde par filtre peut être ajusté pour obtenir des images polychromatiques. De plus, il est important de vérifier que la longueur d'onde d'observation soit compatible avec celle du module AOC .

Bande	Y1	Y2	Y3	J1	J2	J3	J4	H1	H2	H3	H4	K1	K2
λ_{min} (nm)	947.5	997.5	1035	1105	1165	1245	1305	1480	1560	1640	1704	2047	2194
λ_{max} (nm)	992.5	1042.5	1091	1161	1215	1295	1355	1534	1614	1694	1758	2153	2300

TAB. 5.4 – Longueurs d'onde minimale et maximale pour chaque filtre DBI.

- Le type de coronographe (masque coronographique et Lyot stop) : 4QPM, Coronographe de Lyot classique (CLC), ALC et AGPM.
- Les paramètres du spectroscopie à fente : largeur de fente et rayon du masque du coronographe de Lyot qui est nécessaire pour bloquer l'étoile. Il faut noter que le mode de spectroscopie à fente est sélectionné comme un coronographe.

- Les fichiers correspondants aux résidus : fichiers ascii tenant compte des effets de la non-parfaite achromatisation du 4QPM et de l'AGPM et de la variation du pointage de la PSF en fonction de la longueur d'onde due à l'ADC.
- La séparation des planètes : 5 planètes sont générées par le module, leurs séparations sont respectivement de 0.1", 0.2", 0.5", 1" et 2". Elles sont situées sur une diagonale du plan image pour éviter la zone morte du 4QPM.
- Les effets de polarisation : cette option peut être utilisée pour simuler le mode d'imagerie différentielle polarimétrique ; elle est actuellement désactivée par défaut.
- Les aberrations différentielles : aberrations chromatiques (incluant le défocus et les aberrations de phase pré- et post-coronographe) et différence de position entre l'étoile cible et l'étoile de référence.

La table 5.5 présente le format et les valeurs par défauts de ces paramètres.

Paramètre	Valeur
Type de coronographe	4QPM parfait, monochromatique ou achromatique, CLC, ALC, AGPM, spectroscopie à fente
Croix du 4QPM	0 ou 1
Polarisation	0 ou 1
Rayon du masque corono du CLC	3, 4 ou 5 λ/D
Rayon du masque corono de l'ALC	de 1.5 à 2.5 λ/D par pas de 0.05 λ/D
Adresse du fichier du Lyot stop	fichier FITS de 256x256 pixels
Adresse du fichier de l'apodiseur	fichier FITS de 256x256 pixels
Filtre	filtres DBI [Y3J1, J2J3, J3J4, H2H3, H3H4, H1H3, K1K2], filtres BBI [Y, J, H, Ks], λ des fentes [basse résolution DL70, et résolution moyenne R800 en Y, J et H]
Nombre de λ /filtre	Pour obtenir des images polychromatiques 1 λ (image monochromatique) suffit pour $r \leq 0.5$ 5 λ est la valeur optimale pour de plus grandes séparations
Adresse du fichier des résidus du 4QPM	fichier ASCII de 3x1000 éléments : Déphasage (en radians) pour les 2 états de polarisation en fonction de λ (en μm)
Adresse du fichier des résidus de l'AGPM	fichier ASCII de 4x300 éléments : Amplitudes (pour les 2 polarisations) et déphasage en fonction de λ (en μm)
Adresse du fichier des résidus de l'ADC	fichier ASCII de 2x138 éléments : Offset (en mas) en fonction de λ (en μm)

TAB. 5.5 – Format des paramètres d'entrée du module IRD de CAOS-SPHERE.

Description et résultat de la simulation : Dans ce module, les calculs effectués pour l'étoile de référence et l'étoile de science sont similaires. Pour chaque longueur d'onde, IRD calcule les amplitudes complexes dans les différents plans coronographiques. Pour chaque itération, IRD fournit une carte d'intensité pour les objets sur l'axe (l'étoile cible et la référence) et hors-axe (les planètes). Les sorties sont 2 tableaux à 4 dimensions pour les objets sur l'axe dont la structure diffère

- Objets sur l'axe : abscisse des pixels, ordonnée des pixels, nombre de filtres, 0 pour l'étoile cible ou 1 pour l'étoile de référence
- Objets hors-axe : abscisse des pixels, ordonnée des pixels, nombre de planètes, nombre de filtres

Description détaillée des routines de réduction fournies avec le package CAOS-SPHERE que j'ai utilisées :

A partir de la structure générée en sortie du Software CAOS-SPHERE, il est nécessaire de créer les images des PSF obtenues au niveau du détecteur de l'instrument. Pour ce faire, j'ai utilisé les deux routines de réduction `pfb_ird_snr.pro` et `pfb_ird_contrast.pro` qui permettent de traiter les données de simulation de l'imageur différentiel IRDIS. Tout d'abord, les données simulées sont rééchantillonnées à l'échelle d'IRDIS avec un échantillonnage à la longueur d'onde de Shannon à $\lambda = 0.95 \mu m$.

Ensuite, et uniquement dans la routine `pfb_red_ird_snr.pro`, sont introduits la photométrie de l'étoile et des planètes selon le type spectral, la distance et la température des planètes ainsi que les bruits de photon, de lecture, de champs plat et du fond de ciel.

Puis on calcule les PSF d'imagerie différentielle après simple et double soustraction : pour ce faire, les images du 2^{ème} filtre sont remises à l'échelle du premier filtre (à la fois pour les PSF de référence et coronographiées). La simple différence est une simple soustraction des deux PSF à la même échelle. La double différence consiste quant à elle à soustraire pour chaque filtre, la PSF résiduelle après simple soustraction de l'étoile cible à celle de l'étoile de référence.

La figure 5.8 montre un exemple des PSF obtenues après traitement par la routine de réduction.

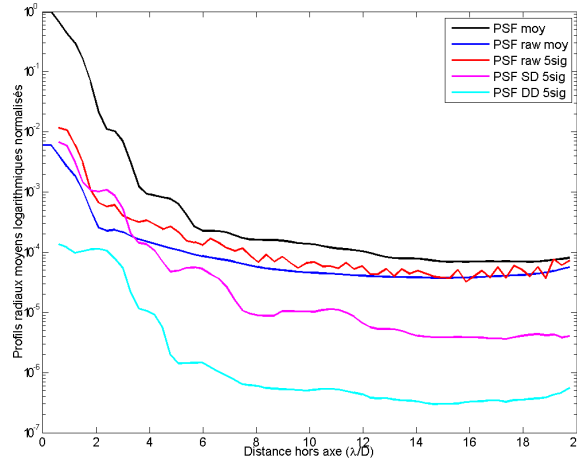


FIG. 5.8 – Exemple de PSF obtenues après la réduction de données.

Les notations utilisées dans la figure correspondent aux entités suivantes :

- PSF moy : PSF non coronographiée moyenne sur l'intervalle spectral considéré.
- PSF raw moy : PSF coronographiée moyenne sur l'intervalle spectral considéré.
- PSF raw 5sig : Détektivité à 5σ à partir de la PSF coronographiée moyenne sur l'intervalle spectral considéré.
- PSF SD 5sig : Détektivité à 5σ à partir de la PSF coronographiée après simple différence.
- PSF DD 5sig : Détektivité à 5σ à partir de la PSF coronographiée après double différence.

Nous pouvons ainsi voir l'apport non négligeable en terme de contraste des PSF de l'imagerie différentielle comparée aux PSF brutes avec un gain supérieur à une décade.

5.5 Optimisation de la taille du masque coronographique de l'ALC pour l'instrument SPHERE

L'objectif de cette étude est la détermination de la taille du masque coronographique de l'ALC produisant les meilleures performances possibles.

Pour ce faire, on fait varier la taille du masque coronographique de 3.0 à $5.0 \lambda/D$ par pas de $0.1 \lambda/D$ et on génère les apodiseurs optimaux correspondants. Les profils en transmission de ces derniers ont déjà été présentés dans la section 5.3 sur la figure 5.1. Des simulations des performances de l'ALC avec ces différents couples apodiseurs/masque coronographique sont ensuite effectuées sous CAOS-SPHERE, avec un diaphragme de Lyot identique à la pupille d'entrée et les filtres spectraux H2H3 (avec un échantillonnage de 5λ par filtre).

5.5.1 Cas idéal

Ces simulations sont effectuées sans atmosphère ni aberrations. La figure 5.9 présente l'évolution des contrastes à $0.2''$, $0.5''$, $1''$ et $2''$ en fonction du diamètre du masque coronographique.

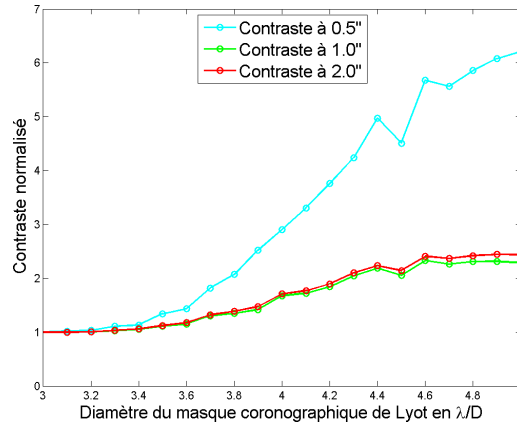


FIG. 5.9 – Optimisation de la taille du masque coronographique dans le cas idéal : évolution des contrastes de l'ALC à $0.5''$, $1.5''$ et $2''$ en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique.

Il apparaît ici que plus le diamètre du masque augmente, meilleur est le contraste. Ceci paraît logique puisque l'on augmente la portion de la tache d'Airy de l'étoile de référence qui est obstruée. Il n'est cependant pas possible de décider la valeur optimale du diamètre du masque.

5.5.2 Cas réel en tenant compte des aberrations

Ces simulations sont effectuées sans atmosphère mais en tenant compte des aberrations en utilisant les paramètres par défaut du module COP. La figure 5.10 présente l'évolution des contrastes normalisés à $0.2''$, $0.5''$, $1''$ et $2''$ en fonction du diamètre du masque coronographique.

Pour la courbe (a) montrant l'évolution du contraste brut normalisé, la taille optimale du masque coronographique est comprise entre 3.8 et $4.2 \lambda/D$. De plus, si l'on tient compte de la forme de la PSF (rapport de flux entre l'intensité totale et l'intensité maximale), la nouvelle courbe de contraste obtenue (b) indique que le diamètre optimal est clairement $4\lambda/D$.

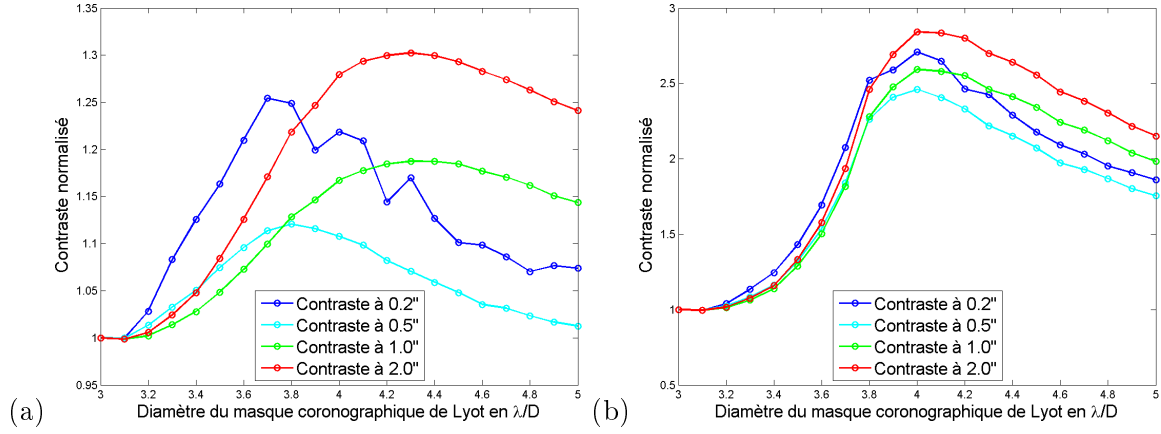


FIG. 5.10 – Optimisation de la taille du masque coronographique en tenant compte des aberrations : évolution des contrastes de l'ALC à 0.2'', 0.5'', 1'' et 2'' en fonction du diamètre angulaire du masque coronographique pour (a) le cas brut, (b) en tenant compte de l'allure de la PSF.

De plus, nous avons vu en 5.3 que l'apodiseur optimisé pour un masque de $4\lambda/D$ correspond à celui dont la transmission est maximale.

5.5.3 Conclusion

Au vu des évolutions des contrastes, le diamètre angulaire du masque coronographique donnant les meilleures performances est $4\lambda/D$. L'allure de l'apodiseur optimisé correspondant à ce diamètre de masque a déjà été présenté sur la figure 2.5 ; celui-ci à la forme d'un bagel.

5.6 Tolérancement du profil en transmission de l'apodiseur

Le but de cette partie est de déterminer les tolérances sur le profil en transmission de l'apodiseur qui sont à fournir au fabricant.

Pour ce faire, on crée différents apodiseurs présentant des défauts de transmission par rapport à l'apodiseur optimal. Ces apodiseurs sont ensuite insérés dans CAOS-SPHERE afin de déterminer les effets résultant des erreurs de transmission sur les performances coronographiques.

Les différents types d'imperfections qui ont été introduites sur le profil en transmission idéal de l'apodiseur sont représentées sur la figure 5.11 et sont les suivantes :

- ajout d'un pic localisé (ceci simule le défaut principal existant sur le tout premier prototype d'apodiseur qui avait été fabriqué par la société INO) (fig. 5.11 (a)),
- introduction d'un plateau au niveau de la bosse c'est-à-dire la région où la transmission est proche de 1 (fig. 5.11 (b)),
- introduction de rugosités sinusoïdales tout au long du profil (fig. 5.11 (c)),
- ajout d'une imperfection assimilable à gaussienne au centre de l'apodiseur ou sur les bords afin de simuler un excès ou un défaut de dépôt par rapport au gabarit (fig. 5.11 (d)).

Afin de quantifier l'ampleur des défauts introduits, on définit l'erreur relative Err par rapport au profil en transmission optimal de la manière suivante :

$$Err = \frac{\text{Apodiseur avec défaut} - \text{Apodiseur idéal}}{\text{Apodiseur idéal}}$$

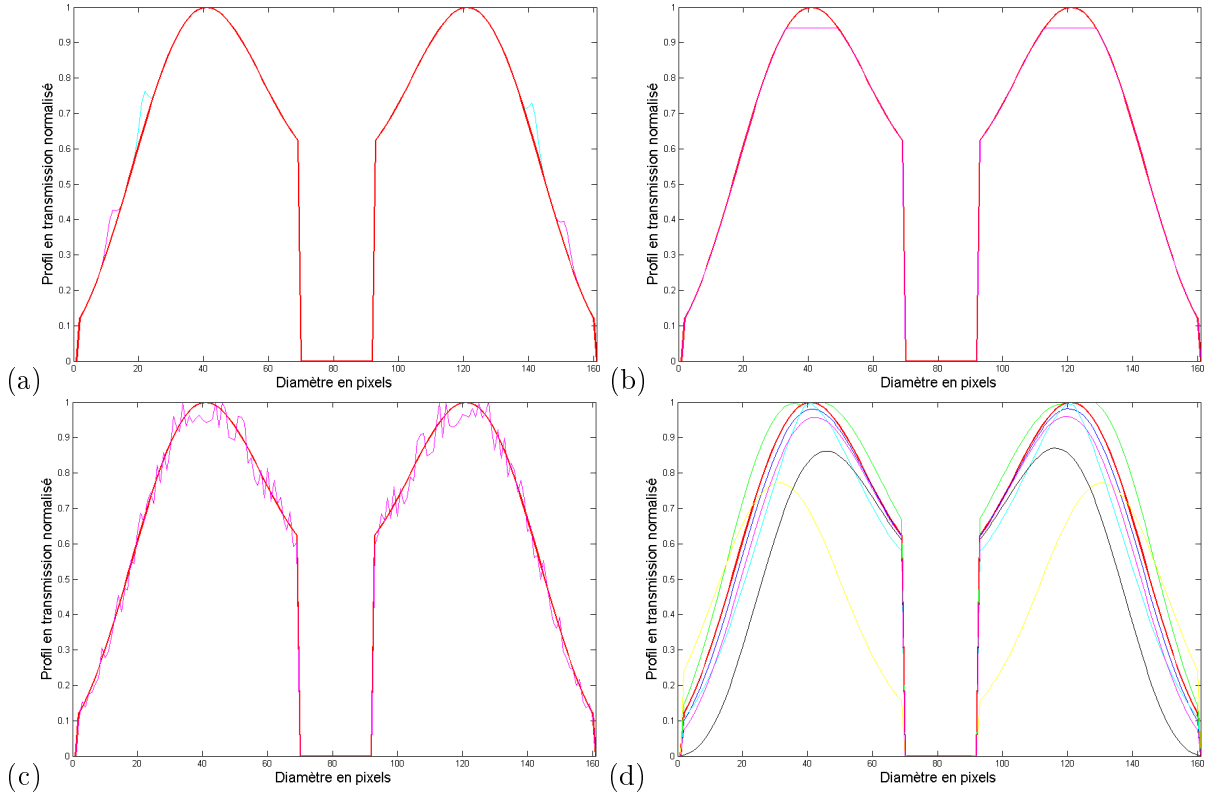


FIG. 5.11 – Vue 1D des différents défauts introduits sur le profil en transmission de l'apodiseur par rapport à l'apodiseur idéal (représenté en rouge) : (a) présence d'une bosse assimilée à un pic localisé, (b) plateau dans la région où la transmission est maximale, (c) profil idéal entaché de rugosités sinusoïdales, (d) erreur de dépôt qui sous-estime ou sur-estime le gabarit idéal fourni.

On a fait varier les erreurs relatives moyennes sur la transmission des apodiseurs présentant des défauts de 0 à 25%. La figure 5.12 montre un exemple de PSFs post-coronographe obtenues avec deux apodiseurs imparfaits ((b) et (c)) comparé à l'apodiseur idéal ((a)).

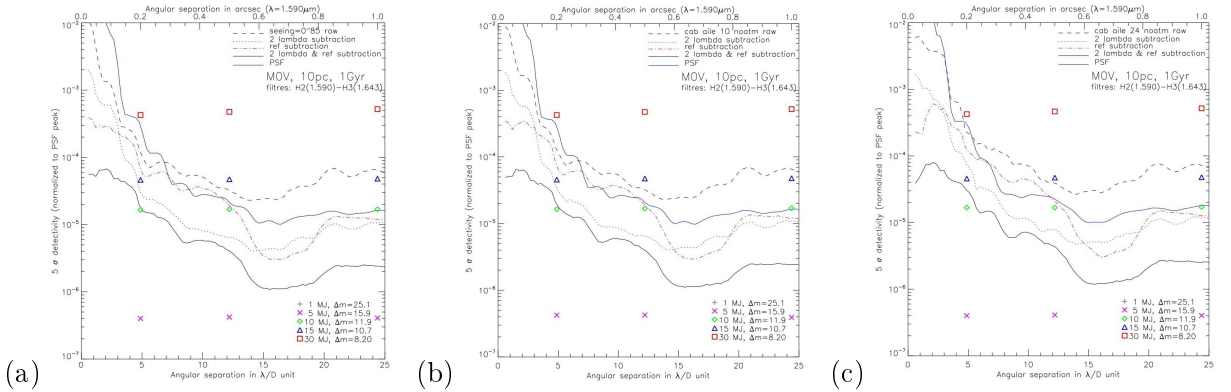


FIG. 5.12 – Profils radiaux des PSF post-coronographe avec (a) l'apodiseur idéal et deux apodiseurs présentant des erreurs de transmission relatives moyennes de (b) 10% et (c) 25%.

On peut voir qu'il existe une faible différence entre les différents types de PSF et ce quelle que soit l'erreur de transmission de l'apodiseur. Cependant, pour l'apodiseur avec une tolérance moyenne de 25%, on s'aperçoit que certaines planètes ne sont pas détectables en raison de la remontée des PSF.

Afin de déterminer une limite acceptable de tolérance, on trace l'évolution des contrastes des PSF à une séparation de $0.5''$ que l'on superpose à la courbe montrant l'évolution du contraste brut normalisé pour des diamètres de masque coronographique allant de 3.0 à $5.0 \lambda/D$, qui avait été obtenue dans la section précédente. La figure 5.13 montre un exemple des types de défauts introduits sur les apodiseurs (a) ainsi que leur répercussion sur l'évolution du contraste à $0.5''$ (b).

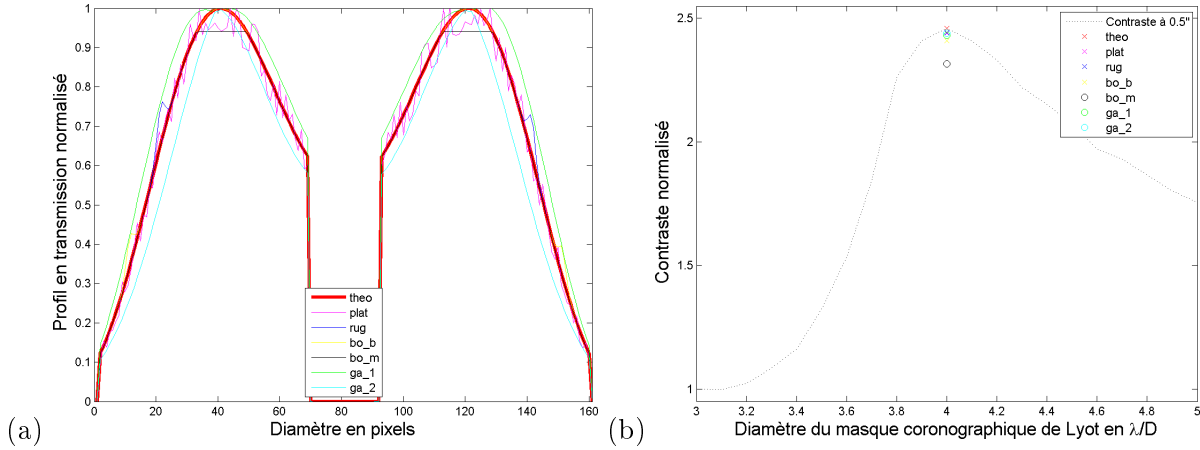


FIG. 5.13 – Evolution des contrastes normalisés à $0.5''$ (b) pour différents types d'apodiseurs avec défauts (a) : theo = apodiseur théorique, plat = apodiseur avec plateau, rug = apodiseur avec des rugosités, bo_b = apodiseur avec une bosse au bord, bo_m = apodiseur avec une bosse au milieu, ga_1 = apodiseur avec un gabarit extérieur de 10% , ga_2 = apodiseur avec un gabarit intérieur de 10%.

Plusieurs tests ont été effectués pour définir un gabarit à fournir au fabricant. Le critère de sélection est d'obtenir un contraste dont la valeur reste comprise à celles obtenues pour des diamètres de masque coronographique allant de 3.8 et $4.2 \lambda/D$. Cette plage correspond à la plage de taille optimale du masque coronographique qui avait été déterminée dans la section précédente.

En interprétant les différentes courbes obtenues, il a été ainsi possible d'établir les conclusions suivantes :

- une tolérance relative de 10% sur les ailes de l'apodiseur est acceptable et la partie centrale du profil semble être moins sensible aux défauts.
- en outre, une spécification sur la régularité du profil a été définie : l'écart de pente entre le profil idéal et le profil réel qui est représenté par l'angle α sur la figure 5.14, doit être inférieur à 30%.

De plus, les courbes de limites de tolérances inférieures et supérieures ont été définies : elles sont visibles sur la figure 6.5 du chapitre suivant.

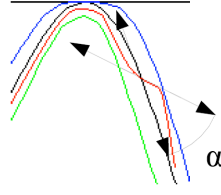


FIG. 5.14 – Définition de l'angle α spécifiant la régularité du profil en transmission de l'apodiseur : (rouge) profil réel, (noir) profil théorique idéal souhaité, (vert) limite de tolérance relative inférieure, (bleu) limite de tolérance relative supérieure. α correspond à l'écart de pente entre le profil réel et le profil idéal.

5.7 Tolérancement du positionnement des composants de l'ALC

Dans cette partie, je m'intéresse à définir par simulation la valeur des tolérances sur le positionnement latéral des composants de l'ALC. Des valeurs de tolérance ont été données dans le document SPHERE Coronagraph Design Report [27]. Elles ont été établies à partir des tolérances de positionnement du 4QPM et des retours d'expériences faites avec l'ALC $3\lambda/D$ et sont données dans la table 5.6

	Apodiseur	Masque coronagraphique	Lyot stop
Tolérance absolue	± 0.1 mm	± 0.05 mm	± 0.075 mm
Stabilité	± 0.02 mm	± 0.77 μ m	± 0.025 mm

TAB. 5.6 – Tolérances a priori sur le positionnement latéral des composants de l'ALC issues du SPHERE Coronagraph Design Report (Boccaletti et al., 2007 [27]).

Par des simulations effectuées avec CAOS-SPHERE, je vais pouvoir affiner les valeurs de ces tolérances. Ces simulations prennent en compte les aberrations du common path mais pas l'atmosphère.

5.7.1 Etude du décentrage de l'apodiseur

On décentre l'apodiseur latéralement en X par rapport à sa position nominale. Ceci est effectué en décalant du nombre de pixels adéquat le tableau diaphbig de la routine pfb_amp_complex.pro. Plusieurs valeurs de décalages latéraux δX de l'apodiseur ont été introduites :

- $\delta X = 0.1$ mm équivalent à un décentrage de 0.011 rayon de l'apodiseur
- $\delta X = 0.25$ mm équivalent à un décentrage de 0.028 rayon de l'apodiseur
- $\delta X = 0.5$ mm équivalent à un décentrage de 0.056 rayon de l'apodiseur
- $\delta X = 1$ mm équivalent à un décentrage de 0.111 rayon de l'apodiseur

Le graphe à gauche de la figure 5.15 présente les résultats obtenus pour ces valeurs de déplacements latéraux.

Le décentrage de l'apodiseur induit une augmentation de l'extinction ainsi qu'une diminution des contrastes au niveau des anneaux suivants (et donc de la réjection). L'augmentation de l'extinction est due à la modification locale de la transmission de la pupille d'entrée produite par le déplacement de l'apodiseur.

Pour obtenir la valeur d'une tolérance, il est nécessaire d'effectuer de plus petits déplacements : le graphe obtenu est visible à droite de la figure 5.15. La tolérance est de ± 0.15 mm.

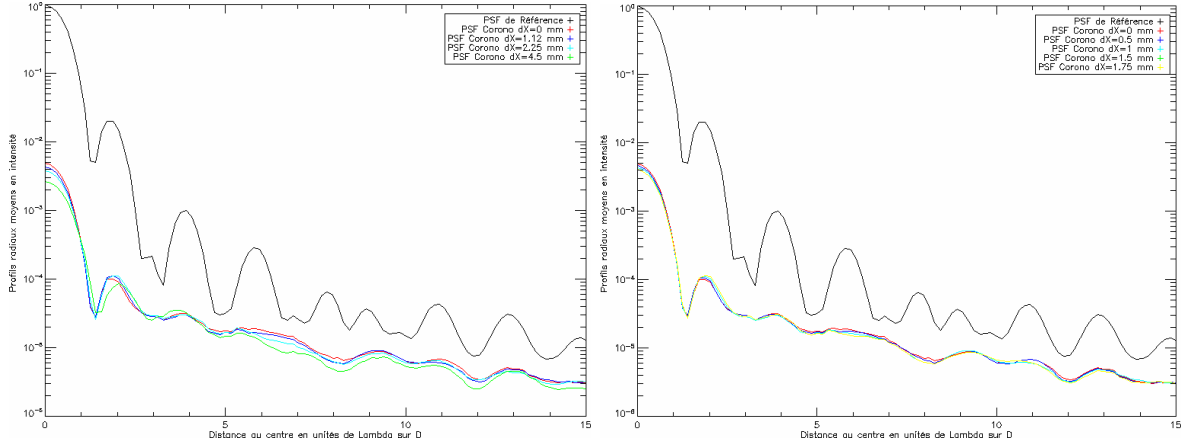


FIG. 5.15 – Influence du décentrage de l'apodiseur : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.

5.7.2 Etude du décentrage du masque coronographique

On décentre le masque coronographique latéralement en X par rapport à sa position nominale. Ceci est effectué en décalant du nombre de pixels adéquat le tableau mask de la routine pfb_corolyot.pro. La figure 5.16 présente les résultats obtenus pour de grandes valeurs de déplacements latéraux puis de plus petite afin de déterminer la valeur de la tolérance. La partie gauche de la figure 5.16 présente les résultats obtenus pour des déplacements latéraux de 0.01 mm, 0.02 mm, 0.05 mm et 0.1 mm ce qui équivaut à des décalages respectifs de 0.08, 0.16, 0.39 et 0.78 rayon du masque coronographique.

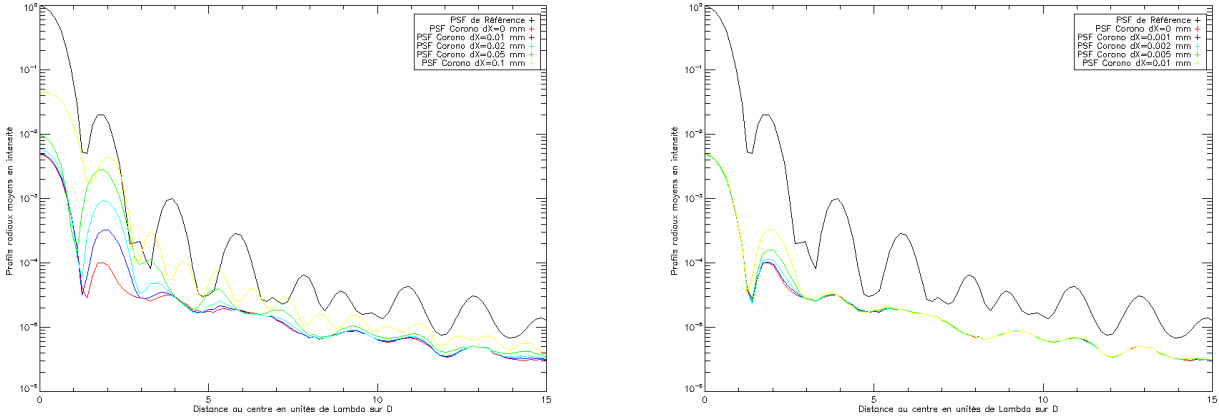


FIG. 5.16 – Influence du décentrage du masque coronographique : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.

On peut voir une très grande sensibilité au déplacement du masque coronographique qui se traduit par une remontée de l'intensité du 2^{ème} anneau de la figure d'Airy. Pour déterminer la valeur de la tolérance, il est nécessaire de faire des simulations pour des déplacements inférieurs à 10 μm (voir figure 5.16 à droite) : on en déduit une valeur de tolérance de ± 0.002 mm.

5.7.3 Etude du décentrage du diaphragme de Lyot

On décentre le Lyot stop latéralement en X par rapport à sa position nominale. Ceci est effectué en décalant du nombre de pixels adéquat le tableau diaphbig de la routine pfb_corono.pro. La figure 5.17 présente les résultats obtenus.

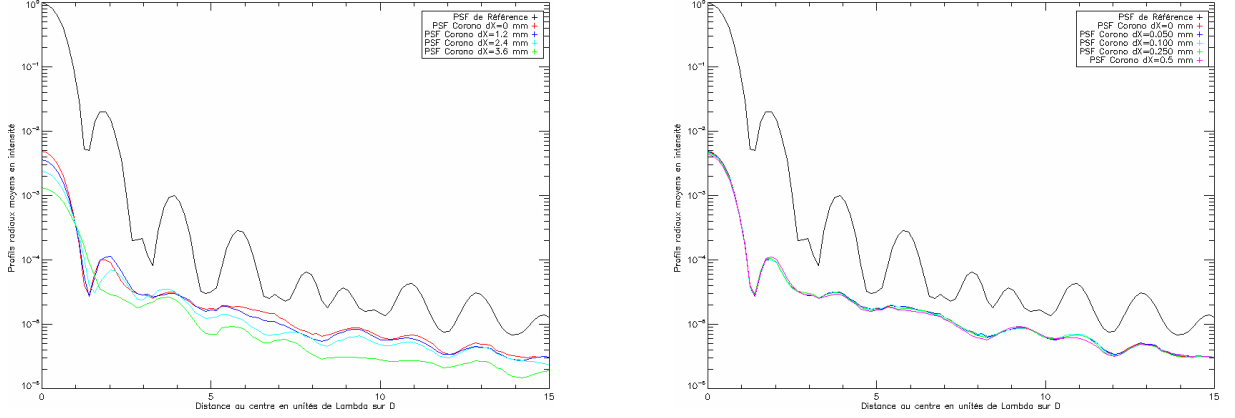


FIG. 5.17 – Influence du décentrage du Lyot stop : profils des PSF post-coronographe obtenues pour différentes valeurs de décentrage.

A gauche de la figure des déplacements équivalents à des rayons de diaphragme de Lyot de 0.25, 0.5 et 0.75 ont été introduits : on peut voir la faible sensibilité au décalage du diaphragme de Lyot. A partir des courbes de la droite de la figure 5.17, il apparaît que la tolérance est de ± 0.5 mm.

5.7.4 Conclusion sur le décentrage des composants de l'ALC

La table 5.7 recense les valeurs des tolérances sur le positionnement latéral de l'apodiseur, du masque coronographique et du diaphragme de Lyot déduites des simulations qui viennent d'être effectuées.

	Apodiseur	Masque coronographique	Lyot stop
Tolérance absolue simulée	± 0.15 mm	± 0.002 mm	± 0.5 mm
Tolérance absolue a priori	± 0.1 mm	± 0.05 mm	± 0.075 mm

TAB. 5.7 – Tolérances sur le positionnement latéral des composants de l'ALC déduites des simulations comparées à celles définies a priori dans le SPHERE Coronagraph Design Report (Boccaletti et al., 2007 [27]).

Ces valeurs ont été obtenues en tenant compte des aberrations de l'instrument ; elles ne peuvent donc pas être comparées avec celles obtenues expérimentalement en laboratoire mais constituent néanmoins un bon indicateur.

5.8 Etude des "ghosts" introduits par l'apodiseur

Cette partie traite de l'étude des ghosts, les réflexions parasites introduites par la traversée de l'apodiseur, composant optique multicouche d'épaisseurs et d'indices différents et dont les effets sont non négligeables puisque l'on pourrait prendre une simple réflexion générée par l'instrument comme étant du signal réel issu de l'objet observé. Le but de cette partie est d'obtenir une spécification sur la position du ghost n'affectant pas les performances coronagraphiques. Pour ce faire, on calcule une pupille dite de ghost contenant à la fois les intensités dues à la transmission variable de l'apodiseur et aux ghosts afin d'obtenir in fine des simulations plus réalistes des PSF apodisées et conclure quant à la spécification à définir.

5.8.1 Besoins de l'instrument SPHERE concernant les ghosts

Les spécifications techniques de l'instrument SPHERE considèrent deux classes de ghosts (Dohlen, 2006 [40]) :

- les ghosts brillants, d'intensité cumulée supérieure à 10^{-5} et de fraction azimuthale inférieure à 5%,
- les ghosts de faible, luminosité d'intensité cumulée supérieure à $5 \cdot 10^{-7}$ et de fraction azimuthale inférieure à 20%.

Ceci signifie que l'on peut accepter des ghosts brillants ($\geq 10^{-5}$) tant qu'ils sont relativement petits et bien séparés de l'étoile et qu'ils ne totalisent pas plus de 5% des 360° en azimuth entourant l'étoile c'est-à-dire un secteur supérieur à 18° . Pour les ghosts peu lumineux, compris entre 10^{-5} et $5 \cdot 10^{-7}$ du pic d'intensité stellaire, le secteur autorisé augmente de 20%. Des ghosts plus faibles que $5 \cdot 10^{-7}$ sont acceptés sans restriction.

5.8.2 Calcul de la pupille de ghost

On s'intéresse au ghost introduit par l'apodiseur créé par la réflexion du faisceau lumineux sur la face arrière du substrat puis sur la face où la couche d'Inconel a été déposée comme représenté par la figure 5.18 [27].

Au premier ordre, le calcul de la pupille de ghost prend en considération la transmission de l'apodiseur $T_a(r)$ (en bleu sur la figure), le coefficient de réflexion de la face arrière du substrat de l'apodiseur R_t et le coefficient de réflexion de l'apodiseur $R_a(r)$ (en rouge sur la figure) qui a été calculé dans la section 3.4.5. On s'attend à ce que la valeur du coefficient de réflexion de la face arrière de l'apodiseur R_t soit au moins inférieur à 1% dans les bandes Y, J, H, Ks et inférieur à 0.5% dans les bandes Y, J et H.

Pour calculer la pupille de ghost, on suppose que le substrat est infiniment fin ce qui nous permet de négliger les effets des phénomènes d'interférence et de diffraction. L'intensité dans la pupille de ghost $P_{Ghost}(r)$ est approximée par la formule suivante :

$$P_{Ghost}(r) = T_a(r) * R_t * R_a(r) \quad (5.1)$$

Si l'on suppose que R_t vaut 0.5%, le profil en intensité de la pupille de ghost correspond à celui de la figure 5.19.

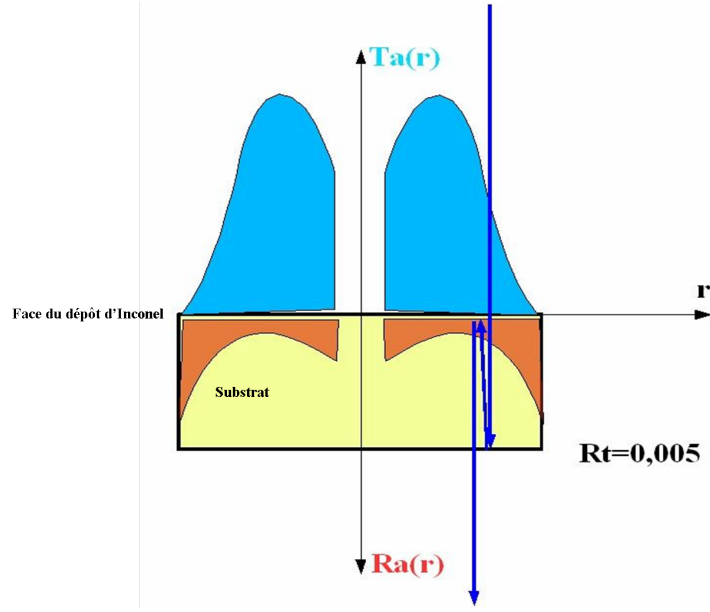


FIG. 5.18 – Schéma de principe du ghost étudié : réflexion sur la face arrière de l'apodiseur puis sur l'interface substrat-Inconel. Les flèches bleues indiquent le sens de propagation du faisceau.

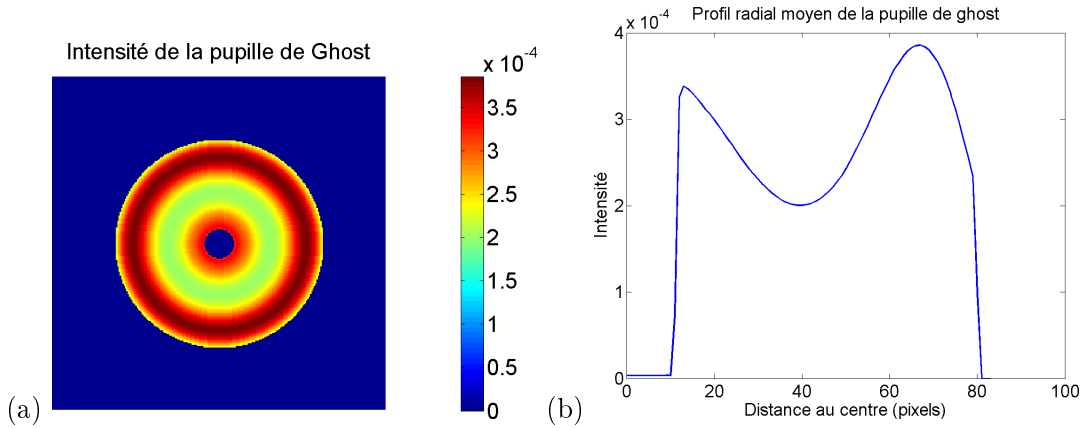


FIG. 5.19 – Intensité dans la pupille de ghost : (a) vue 2D, (b) profil radial moyen.

5.8.3 Simulation de la PSF de ghost

La pupille de ghost précédemment obtenue est introduite dans les simulations utilisant le Software Package CAOS-SPHERE afin de calculer la PSF en sortie de l'ALC correspondant à ce ghost. Les simulations ont été effectuées pour plusieurs valeurs de décentrage du ghost par rapport au centre optique et donc par rapport au masque coronographique : ainsi les cas simulés correspondent aux cas où le ghost est parfaitement coronographié, le ghost est partiellement coronographié et où l'image du ghost est légèrement hors du masque. La figure 5.20 présente les résultats obtenus pour des décentrages du ghost (en valeurs de rayons du masque coronographique) de 0, 0.4, 0.8 et 1.2 et si la valeur de R_t est 0.5%.

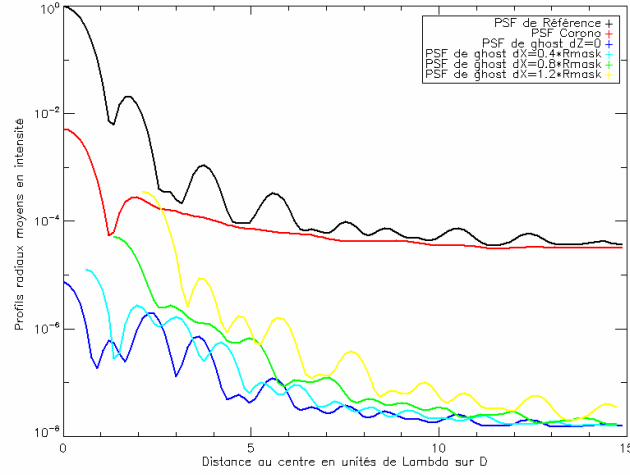


FIG. 5.20 – Profils radiaux moyens des PSF de ghost pour différentes valeurs de décentrage du ghost avec résidus atmosphériques et aberrations statiques et pour $R_t = 0.5\%$.

Les paramètres de la simulation sont les suivants :

- domaine spectral : Bande H2 (de $1.56 \mu\text{m}$ à $1.614 \mu\text{m}$).
- aberrations atmosphériques présentes : valeurs par défaut (voir figure 5.7).
- jitter instrumental : 3 mas.
- résidus de calibration de l'OA : 7.4 nm.
- erreur due à la propagation de Fresnel : 4.7 nm.
- décalage de faisceau : 8 nm.

Tout d'abord, on détermine l'intensité relative de ghost qui est définie comme étant le rapport des intensités entre le ghost et le pic d'intensité de l'image stellaire non coronographiée : dans notre cas elle vaut $5 \cdot 10^{-4}$ si l'on considère la PSF de ghost hors-axe.

Ensuite, en imagerie différentielle et en ajoutant du bruit (bruit de lecture de $10 e^-$, bruit de flat field présentant des fluctuations de 10^{-3} , fond de ciel de $14.4 \text{ mag/arcsec}^2$), on obtient les courbes de la figure 5.21. Les aberrations différentielles et chromatiques (défocus de 4 mm, pupil shear, résidus de l'ADC, offset de pointage de 0.5 mas) sont aussi introduites.

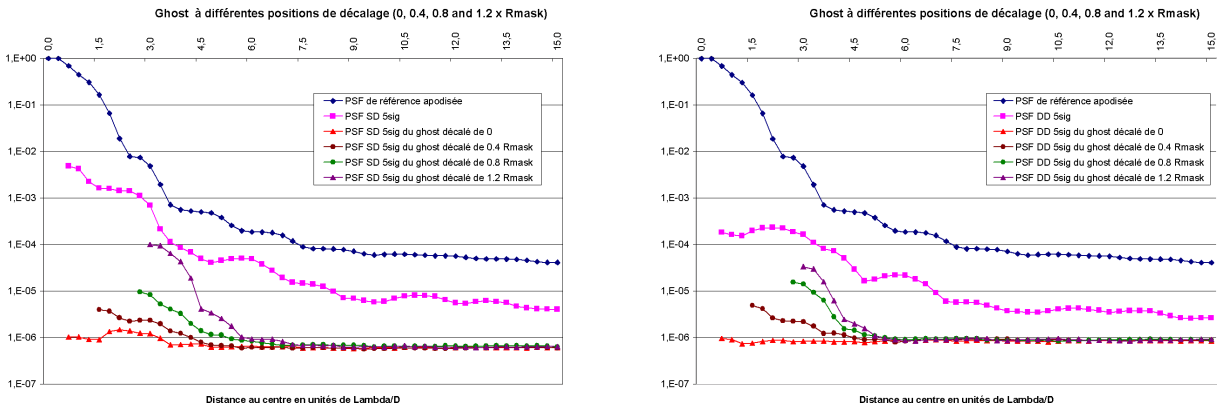


FIG. 5.21 – Profils radiaux moyens des PSF DD et SD de ghost pour différentes valeurs de décentrage du ghost avec résidus atmosphériques et aberrations statiques et pour $R_t = 0.5\%$.

Ces simulations nous amènent à conclure que l'atténuation du ghost est suffisante et n'affecte pas les performances coronagraphiques si le désalignement du ghost par rapport au masque coronagraphique est inférieur à 0.4 fois la valeur du rayon du masque coronagraphique.

5.9 Etude de l'influence de l'erreur de front d'onde introduite par l'apodiseur

J'ai calculé au chapitre 3 le profil radial du déphasage introduit en transmission par l'apodiseur. A partir de ce profil, on reconstruit la carte 2D de déphasage. Afin de tenir compte de la transmission complexe de l'apodiseur, on rentre ainsi dans CAOS SPHERE au niveau de l'apodiseur deux fichiers fits : le premier correspond à la partie réelle de sa transmission (module) et le deuxième à la partie complexe de cette dernière (phase) . La figure 5.22 présente les PSF obtenues, à savoir les PSF brutes moyennes et après double différence : les désignations apodiseur réel et apodiseur complexe correspondent à l'apodiseur sans et avec déphasage.

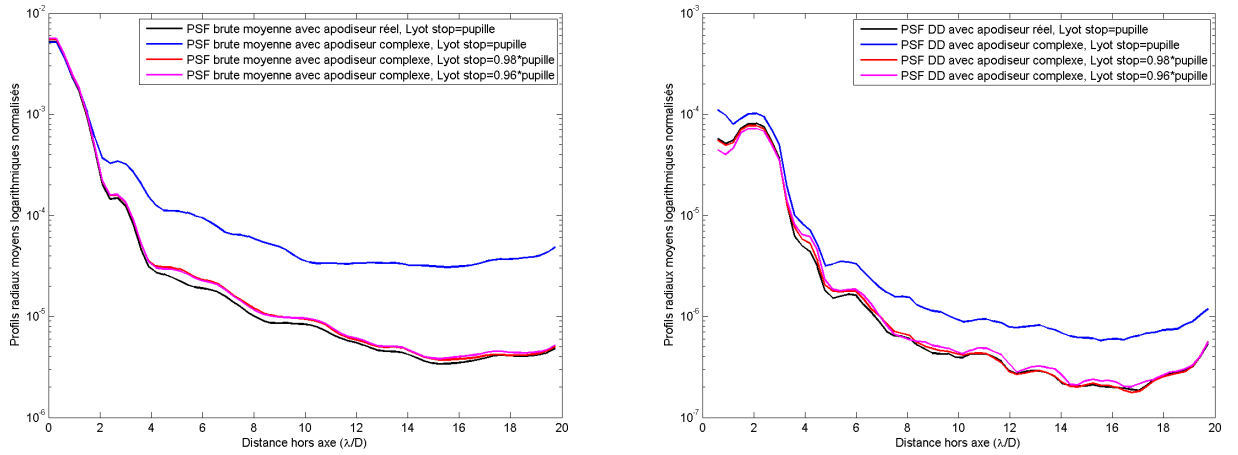


FIG. 5.22 – Profils de PSF post-coronographe en tenant compte du déphasage introduit par l'apodiseur et pour différents diaphragmes de Lyot.

Les simulations ont été effectuées en introduisant deux Lyot stop de taille légèrement sous-dimensionnée par rapport à la pupille d'entrée ; leurs diamètres extérieurs valent respectivement 0.98 fois et 0.96 fois celui de la pupille. En effet, un Lyot stop de taille plus petite que celle de la pupille peut supprimer les erreurs d'alignement et les erreurs de front d'onde introduites par les optiques en amont et peut ainsi permettre une meilleure atténuation de la lumière : j'ai eu l'occasion de vérifier ce phénomène lors de tests en laboratoire.

Sur la figure, et dans le cas où le Lyot stop est identique à la pupille, on peut voir la dégradation subie par la PSF qui résulte de l'erreur de front d'onde introduite par l'apodiseur. Cependant, cet effet s'annule si le diamètre du Lyot stop est réduit d'un facteur 0.98 ou 0.96. Pour le prototype de laboratoire, il a été décidé de choisir un Lyot stop avec un facteur de réduction de 0.96 afin de pouvoir tenir compte de l'effet d'imprécision expérimentale de centrage du diaphragme de Lyot qui n'a pas été prise en compte dans cette simulation.

5.10 Conclusion

J'ai présenté les études numériques qui ont été menées en début de phase B du projet SPHERE/VLT afin de dimensionner le prototype de l'ALC infrarouge dont les tests en laboratoire sont présentés au chapitre 6 qui suit. Ces simulations ont été réalisées en utilisant le software package SPHERE pour le système CAOS (Carillet et al. [32]) et ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- le meilleur couple apodiseur/masque coronographique répondant au mieux aux spécifications de l'instrument correspond à un apodiseur optimisé pour un masque coronographique de diamètre angulaire $4\lambda/D$,
- une tolérance globale de 10% sur le profil en transmission de l'apodiseur est requise pour sa fabrication,
- les tolérances sur le positionnement des composants de l'ALC ont été définies,
- l'étude de l'effet des reflets parasites introduits par l'apodiseur a montré que les performances coronographiques ne sont pas affectées si le désalignement du reflet par rapport au masque coronographique est inférieur à 0.4 fois la valeur du rayon du masque coronographique,
- l'influence de l'erreur sur le front d'onde introduite par l'apodiseur n'affecte plus les performances de l'ALC si l'on sous-dimensionne le Lyot stop d'un facteur 0.96.

En outre, ce travail a donné lieu à la rédaction d'un article intitulé "Apodized Lyot coronagraph for SPHERE/VLT : I. Preliminary numerical studies" qui est en cours de soumission à A&A et qui est présenté en annexe.

Chapitre 6

Tests en laboratoire de l'ALC à $4\lambda/D$ dans l'infrarouge

6.1 Introduction

Les tests en laboratoire du coronographe ont été réalisés sur le banc coronagraphique infrarouge du LESIA à l'Observatoire de Paris-Meudon. Ces tests se sont déroulés au cours du premier semestre 2007 et se sont échelonnés en 4 missions durant les mois de mars (2 semaines), avril (1 semaine), mai (1 semaine) et juillet (3 jours). J'ai mené ces missions avec mes collègues du laboratoire Sylvie Robbe-Dubois, Richard Douet et Jean-Baptiste Daban avec l'aide sur place de Jacques Baudrand et Pierre Riaud du LESIA. L'inventaire des travaux effectués durant ces missions est présenté dans le tableau 6.1.

Date de mission	Mesures effectuées	Observations
12 au 23 mars 2007	Transmission de l'apodiseur à $\lambda = 1.55 \mu m$ Performance de l'ALC à $\lambda = 1.55 \mu m$	Eclairement non uniforme de la pupille Présence de franges d'interférence
18 au 27 avril 2007	Transmission de l'apodiseur en bande H Performance de l'ALC en bande H	OK Retard de 3 jours dû à une panne du détecteur
28 mai au 1 ^{er} juin 2007	Transmission de l'apodiseur en bande Y, J, H Performances de l'ALC en bande Y, J, H Sensibilité de l'ALC au défocus de ces composants en bande H	OK Mesures en Y et J à refaire Mesures peu exploitables
27 au 31 juillet 2007	Performances de l'ALC en bande Y, J	Problème de ghosts avec le filtre Y

TAB. 6.1 – Descriptif du travail effectué lors des missions de test de l'ALC sur le banc infrarouge du LESIA.

Les objectifs de ces tests étaient les suivants :

- Mesurer les profils en transmission de l'apodiseur dans les bandes spectrales Y, J et H.
- Mesurer les performances coronagraphiques de l'ALC en bande Y, J et H.
- Etudier la sensibilité des performances coronagraphiques aux désalignements de l'apodiseur, du masque coronagraphique et du Lyot stop.

Ces mesures permettent de vérifier d'une part, la conformité de l'apodiseur aux spécifications et d'autre part, l'adéquation des performances de l'ALC avec celles requises pour les coronagraphes de l'instrument SPHERE/VLT.

6.2 Description du banc de test

Le banc optique infrarouge du LESIA (Boccaletti et al. [26]) a été construit dans le but de tester les prototypes de coronagraphes présents sur l'instrument SPHERE : le coronagraphe à 4 Quadrants à lames demi-onde (HW-4QPM) développé par le LESIA et le coronagraphe de Lyot apodisé (ALC) développé au LUAN.

Design optique du banc

Le banc reproduit le rapport d'ouverture de $F/40$ du plan focal de l'instrument SPHERE où seront installés les masques coronagraphiques. Ce banc comprend plusieurs miroirs paraboliques hors axe, il est donc achromatique. Les paraboles hors-axe ont été traitées par un dépôt d'Or. Le diamètre de la pupille d'entrée est de 18 mm. La figure 6.1 montre le schéma optique du banc infrarouge du LESIA et la figure 6.2 montre son implémentation mécanique.

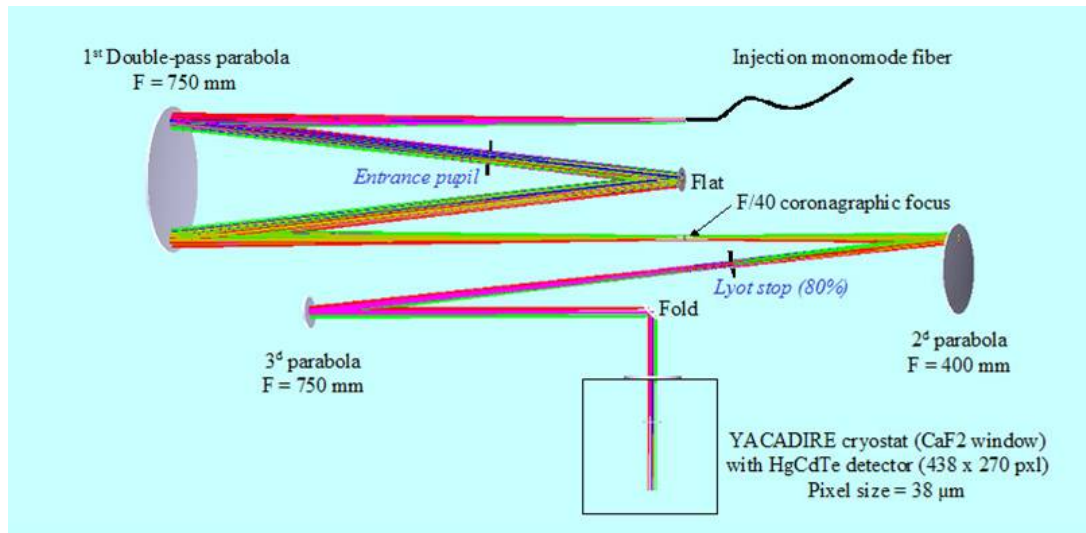


FIG. 6.1 – Schéma optique du banc infrarouge du LESIA (Boccaletti et al. [26]).

Plusieurs modifications ont été apportées par l'équipe du LESIA au banc de test initial [26] afin de garantir une stabilité suffisante de formation des images, condition qui est cruciale pour tout coronagraphe :

- Dissociation du détecteur de la table optique du banc coronagraphique (voir Fig 6.2 (a)). Le système de refroidissement du détecteur génère d'importantes vibrations. Une mesure de contrôle des vibrations a été effectuée avec un accéléromètre après la mise en place du détecteur sur une table optique mitoyenne à celle du coronagraphe : il reste néanmoins

un pic de fréquence d'une amplitude d'environ 0.08 mg à une fréquence de 12 Hz. Cette vibration introduit un déplacement linéaire de la table en granite portant le coronographe d'environ $2.3 \mu\text{m}$ ce qui correspond à un déplacement de l'image de 0.08 pixels sur le détecteur (Boccaletti et al. [26]).

- Ajout d'un capôt, visible en partie sur la Figure 6.2 (b), pour pallier les effets de turbulence atmosphérique générés par le système de climatisation de la salle blanche.

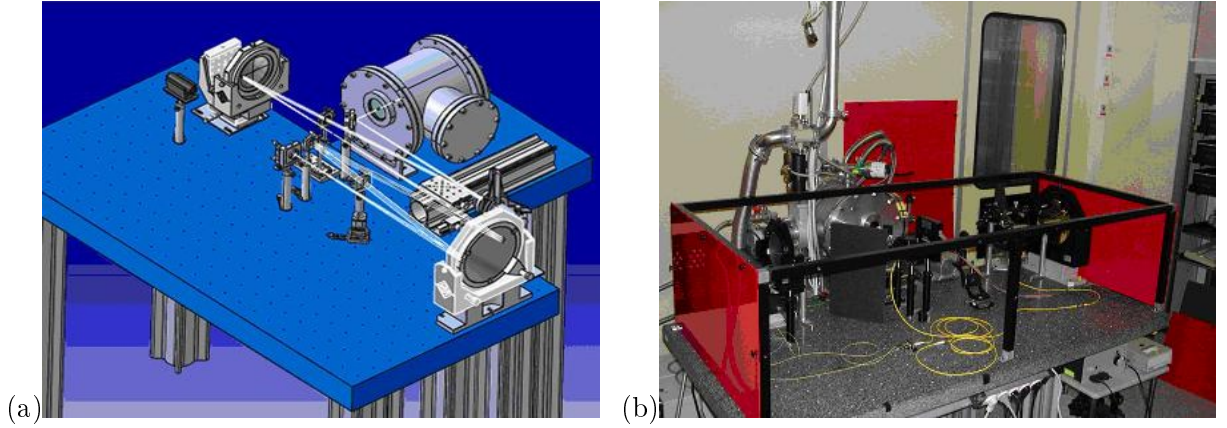


FIG. 6.2 – Implémentation mécanique du banc infrarouge du LESIA [26] : (a) vue 3D sous CATIA ; (b) photo du banc.

Les sources lumineuses disponibles

Trois différentes sources lumineuses fibrées sont disponibles sur le banc optique :

- une diode laser monochromatique à $\lambda = 633 \text{ nm}$ qui a été utilisée pour effectuer la procédure d'alignement
- une diode laser monochromatique à $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ qui correspond à la longueur d'onde centrale de la bande H
- une source laser super-continuum Fianium SC450 polychromatique délivrant un spectre large allant du visible au proche infrarouge : le faisceau émis est monomode de $0.45 \mu\text{m}$ à $2.5 \mu\text{m}$ avec une puissance de sortie de 1 mW/nm

Plusieurs filtres spectraux sont disponibles afin d'effectuer les mesures dans les domaines de longueur d'onde d'observation de l'instrument SPHERE. Ces filtres se placent devant le hublot du détecteur. La Table 6.2 donne les caractéristiques de ceux qui ont été utilisés lors des tests.

Bande	$\lambda_{centrale} (\mu\text{m})$	Valeur FWHM (nm)	Transmission (%)
Y	1.063	52 (R=20)	88
J	1.191	41 (R=30)	85
H	1.68	240 (R=7)	55

TAB. 6.2 – Caractéristiques des filtres spectraux utilisés.

Le détecteur infrarouge

Le détecteur, fabriqué par la société Raytheon, est constitué d'une matrice de 438×270 photodiodes en HgCdTe, hybridée sur un circuit de lecture CMOS (Ghomchi [48], 2001). Les caractéristiques principales du détecteur sont données dans la table 6.3.

Caractéristique	Spécification
Technologie de la matrice photosensible	Photodiode HgCdTe
Type du circuit de lecture	CMOS
Mode de lecture	Snapshot
Taille de la surface sensible de la matrice	438 x 270 pixels
Pas des pixels	38 μm
Température de fonctionnement	65 à 90 K
Domaine spectral	0.95 μm à 5 μm (à 70K)
Charge de saturation	2 10^6 électrons
Rendement quantique globale pour un flux de photons entre 6.10^7 et $2.10^{11} \text{photons/s}$	$\geq 50\%$
Courant d'obscurité moyen à 70K	$\leq 10 \text{ fA}$
Courant d'obscurité moyen à 90K	$\leq 100 \text{ fA}$
Courant d'obscurité maximal à 70K	$\leq 20 \text{ fA}$
Bruit de lecture (RMS) pour des temps d'intégration jusqu'à 30s	$\leq \sqrt{0.2 Q_{sat}}$ électrons
Non linéarité de la réponse en fonction de la charge (entre 10% et 90% de la dynamique)	$\leq \pm 2\%$
Temps d'établissement à 0.01%	$\leq 5\mu\text{s}$
Diaphonie	$\leq 3\%$
Puissance dissipée	60 mW

TAB. 6.3 – Caractéristiques principales du détecteur Raytheon du banc infrarouge du LESIA [48].

6.3 Caractéristiques des composants propres au coronographe

6.3.1 Le masque pupillaire

Le masque pupillaire a été fabriqué par la société STEC (France) par découpe laser dans une tôle d'acier inoxydable d'épaisseur 0,2 mm. Il reproduit exactement la pupille d'entrée d'un des télescopes du VLT à l'échelle $\frac{1}{444}$ afin d'avoir un diamètre de pupille de 18 mm, comme on peut le voir sur la figure 6.3. La table 6.4 donne les spécifications de fabrication du masque pupillaire.

Paramètre	Valeur
Concentricité des cercles de diamètres 18 mm et 2.52 mm	10 μm
Tolérance sur la circularité du cercle extérieur de 18 mm de diamètre	$\pm 20\mu\text{m}$
Tolérance sur la circularité du cercle intérieur de 2.52 mm de diamètre	$\pm 10 \mu\text{m}$
Rectitude des araignées de 90 μm	$\pm 5 \mu\text{m}$
Planéité de la tôle	$\pm 0.1 \text{ mm}$
Surface de la tôle	optiquement mate

TAB. 6.4 – Spécifications techniques du masque pupillaire.

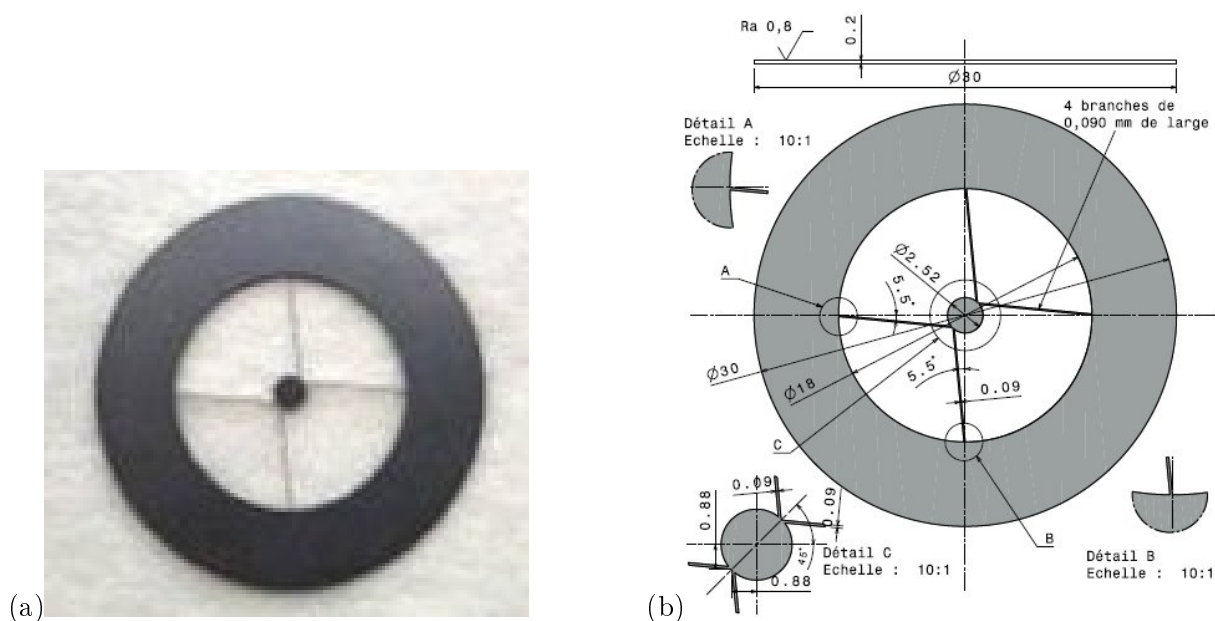


FIG. 6.3 – Photo du masque pupillaire reproduisant la pupille du VLT.

6.3.2 L'apodiseur

L'apodiseur a été fabriqué par la société Reynard Corporation (USA) selon le processus de dépôt d'une couche mince d'Inconel sur un substrat de CaF_2 .



FIG. 6.4 – Photo de l'apodiseur.

Les spécifications de fabrication de l'apodiseur sont données dans la figure 6.5. La figure 6.5 montre le profil en transmission souhaité ainsi que les limites de tolérances inférieures et supérieures, telles qu'elles ont été spécifiées au fabricant Reynard.

Avant expédition de l'apodiseur, le fabricant a mesuré son profil en transmission à différentes longueurs d'onde ; les résultats des mesures sont présentés dans la figure 6.6. Ces mesures vont être comparées à celles que j'ai obtenues sur le banc de test dans la section 6.6.1.

Par ailleurs, le fabricant nous a signalé que le composant est hors spécifications par rapport au Scratch/Dig (20/10 au lieu de 10/5) et au parallélisme du substrat (7.4" au lieu de 5").

Paramètre	Valeur
Domaine spectral	950-2320 nm
Diamètre extérieur du dépôt d'Inconel	19.8 ± 0.1 mm
Diamètre intérieur du dépôt d'Inconel	1.0 ± 0.05 mm
Profil en Transmission	Voir Fig. 6.5
Régularité	$\alpha \leq 30^\circ$
Diamètre extérieur du substrat	30 ± 0.1 mm
Epaisseur du substrat	4 ± 0.1 mm
Scratch/dig	10/5
Qualité de surface	$\lambda/10$ PTV @ 633 nm
Parallélisme	< 5 arcsec
Matériau du sustrat	CaF_2
Matériau déposé	Inconel 600
Traitement anti-reflet	$R < 1\%$ à 950-2320 nm
Température d'utilisation	-10° à 40°C
Durée de vie du dépôt	10 ans

TAB. 6.5 – Caractéristiques de fabrication de l'apodiseur.

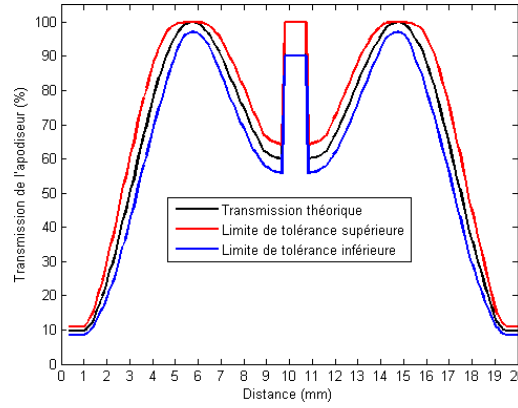


FIG. 6.5 – Spécifications sur le profil en transmission de l'apodiseur : profil en transmission souhaité (noir) et limites de tolérances inférieure (bleu) et supérieure (rouge).

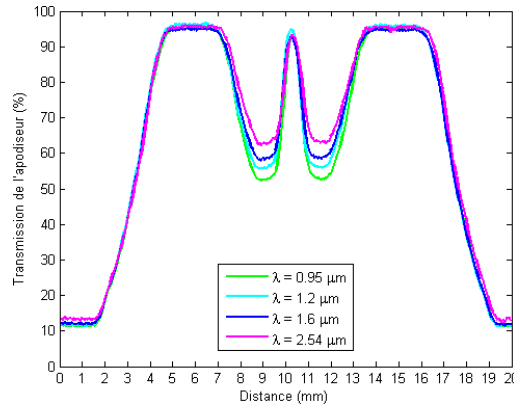


FIG. 6.6 – Mesures de la transmission de l'apodiseur effectuées par le fournisseur Reynard Corporation pour différentes longueurs d'onde : (vert) $0.95 \mu\text{m}$, (cyan) $1.2 \mu\text{m}$, (bleu) $1.6 \mu\text{m}$, (magenta) $2.54 \mu\text{m}$.

6.3.3 Le masque coronographique

Le masque coronographique a été réalisé par photolithographie par la société Micromodule (France) par dépôt de chrome sur un substrat de silice. Le composant comprend une série de pastilles opaques rondes, auxquelles s'ajoutent des motifs opaques rectangulaires et triangulaires comme on peut le voir sur la figure 6.7.

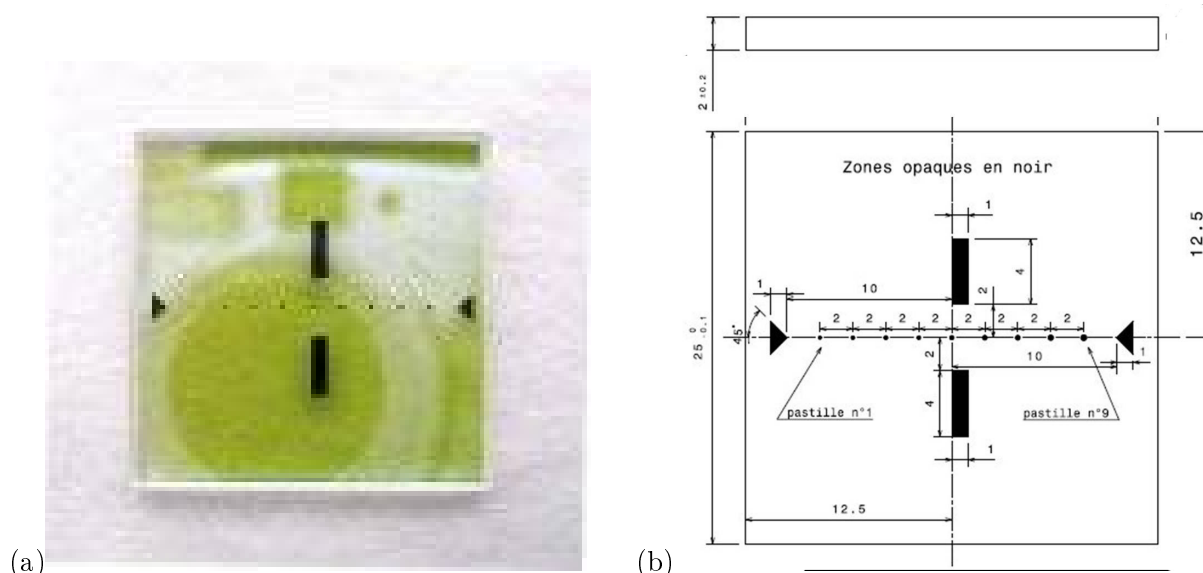


FIG. 6.7 – Masque coronographique : (a) photo et (b) dessin technique montrant les neuf pastilles de Lyot et les motifs rectangulaires et triangulaires d'aide à l'alignement qui ont été déposés.

Les deux motifs opaques rectangulaires sont des couteaux de Foucault ; ils sont utilisés lors de la procédure d'alignement pour positionner au mieux le masque coronographique au foyer. Les deux motifs opaques triangulaires sont aussi utilisés lors de l'alignement ; ils permettent de positionner plus précisément le masque en hauteur. Les autres zones du substrat sont transparentes dans la bande spectrale considérée. Neuf pastilles ont été déposées sur le substrat : pour chaque bande spectrale (Y, J, H), 3 masques de diamètre angulaire différents ($4\lambda/D$, $4.5\lambda/D$ et $5\lambda/D$) ont été réalisés. La table 6.6 donne les caractéristiques de chaque pastille.

Numéro de la pastille	Longueur d'onde d'utilisation (μm)	Diamètre en unités de $\frac{\lambda}{D}$	Diamètre réel (μm)
1	1.05	4	175
2	1.05	4.5	197
3	1.05	5	219
4	1.25	4	208
5	1.25	4.5	234
6	1.25	5	260
7	1.60	4	267
8	1.60	4.5	300
9	1.60	5	333

TAB. 6.6 – Inventaire et caractéristiques des pastilles présentes sur le composant masque de Lyot.

Il sera ainsi possible de faire des études des effets de la chromaticité géométrique du masque coronographique sur les performances de l'ALC pour les 3 domaines de longueurs d'onde de fonctionnement de SPHERE.

La table 6.7 donne les caractéristiques de fabrication du masque coronographique.

Paramètre	Valeur
Diamètre du masque	$4\lambda/D = 256 \mu\text{m} @ 1.6 \mu\text{m}$
Tolérance sur le diamètre du masque	$\pm 1\%$
Densité optique du masque	$> 10^6$
Nature du substrat	IR Silica
Qualité optique du substrat	$\lambda/4$ PTV @ 633 nm
Parallélisme du substrat	$< 1'$
Scratch/dig	10/5
Traitement anti-reflet	0.5%
Température d'utilisation	-10°C à 40°C
Garantie	10 ans

TAB. 6.7 – Spécifications de fabrication du masque coronographique de Lyot.

Par ailleurs, il convient de prendre note que le masque coronographique qui sera monté sur l'instrument SPHERE ne sera pas fabriqué par photolithographie : en effet, un masque suspendu sera installé afin d'éliminer tout ghost pouvant être généré par des réflexions multiples dans le substrat.

6.3.4 Le Lyot stop

Comme pour le masque pupillaire, le Lyot stop est réalisé par découpage laser dans de l'acier inoxydable (STEC, France). La forme du Lyot stop reproduit celle de la pupille d'entrée, ses dimensions ont été optimisées par simulation et sont les suivantes :

- Le diamètre extérieur correspond à 96% du diamètre de la pupille coronographique.
- L'obstruction centrale a un diamètre qui vaut 1.05 fois celui de l'image de la pupille d'entrée au niveau du plan pupille coronographique.
- La largeur des araignées vaut 3 fois celle de la pupille coronographique.

La figure 6.8 montre le schéma mécanique du Lyot stop. La table 6.8 donne les spécifications de fabrication du Lyot stop.

Paramètre	Valeur
Centrage des 2 disques	$\pm 10 \mu\text{m}$
Tolérance sur le diamètre extérieur	$\pm 20 \mu\text{m}$
Tolérance sur le diamètre intérieur	$\pm 10 \mu\text{m}$
Largeur des araignées	$5 \mu\text{m}$
Planéité du métal	$\pm 0.1 \text{ mm}$
Apparence optique du metal	mat

TAB. 6.8 – Spécifications techniques du Lyot stop.

6.4 Procédure d'alignement

Afin de réaliser l'alignement, les conditions pré-requises sont les suivantes :

- Le banc Infrarouge est aligné et réglé pour accueillir un des systèmes coronagraphiques.
- Le 4QPM est monté sur le banc.
- La position du Lyot stop est définie
- La côte mécanique de la pupille d'entrée est connue.

Le masque pupillaire est mis en place à sa position nominale : la hauteur de faisceau est connue et le réglage en Z est grossier. On monte le dispositif d'imagerie de la pupille sur le détecteur de manière à régler la conjugaison entre le masque pupillaire et le Lyot stop du 4QPM (diaphragme de diamètre correspondant à 80 % du diamètre de la pupille). Le Lyot stop du 4QPM est démonté et est remplacé par celui de l'ALC que l'on centre en X,Y par rapport au masque pupillaire. L'apodiseur est mis en place ; on règle son inclinaison par rapport au masque pupillaire par autocollimation à partir de la réflexion du faisceau sur la face avant de l'apodiseur. L'apodiseur est ensuite centré latéralement par rapport au masque pupillaire.

Il reste alors à mettre en place le masque coronagraphique : un premier alignement en tip-tilt de ce dernier est effectué visuellement avec le laser d'alignement, puis la source super-continuum est mise en place. Ensuite, le réglage du focus du masque coronagraphique est réalisé suivant la méthode du test de Foucault ; pour ce faire, on centre le faisceau sur le couteau de Foucault qui est présent sur le masque (cf Fig 6.7) et l'on regarde l'image de la pupille située derrière le couteau. Il est conseillé d'enlever l'apodiseur avant d'effectuer ce réglage. Le principe du test de Foucault, comme expliqué par la figure 6.9, est le suivant :

- si le faisceau est intercepté par le couteau de Foucault au niveau du plan focal, tous les rayons lumineux sont bloqués simultanément et l'ombre du couteau produit un obscurcissement uniforme de la pupille.
- dans le cas contraire, si le couteau de Foucault intercepte le faisceau en amont ou en aval du plan focal, les rayons lumineux ne sont pas interceptés simultanément et ainsi l'ombre n'apparaît que d'un côté ou de l'autre de la pupille.

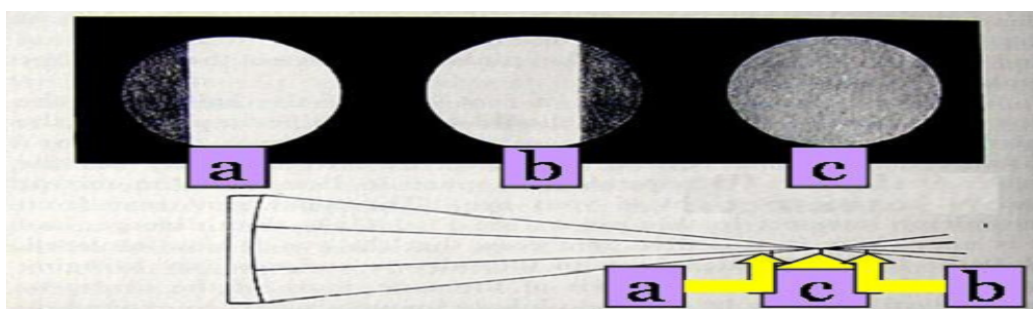


FIG. 6.9 – Principe du test de Foucault : si le couteau est bien positionné au foyer, son ombre illumine la pupille uniformément (cas c) ; dans le cas contraire (cas a et b), l'ombre se trouve d'un coté de la pupille.

Une fois la position du foyer connue, on centre la pastille coronagraphique souhaitée sur le faisceau. L'apodiseur est ensuite remis en place et l'on effectue une optimisation du centrage en X, Y de la pastille coronagraphique. Finalement, le système imageur de pupille est retiré et les acquisitions de PSF peuvent commencer .

6.5 Procédure d'acquisition et de traitement des données

Pour chaque type de mesure, les acquisitions s'effectuent avec une intensité lumineuse délivrée par la source super-continuum constante, on change la valeur du temps d'intégration afin d'utiliser au mieux la dynamique du détecteur. Ce choix a été fait car il n'est pas possible de régler précisément la valeur de la puissance fournie par la source super-continuum, celle-ci étant ajustée par un potentiomètre non gradué.

De plus, aucune image de flat n'a été prise car il n'a pas été possible d'éclairer le détecteur de manière suffisamment uniforme avec les moyens dont nous disposions.

Par ailleurs, un algorithme de recentrage de toutes les poses courtes a été programmé. Cet algorithme a finalement été éliminé des programmes de traitement de données car son apport était limité et il augmentait de plus le temps de calcul de manière non négligeable.

6.5.1 Mesures du profil en transmission de l'apodiseur

On acquiert les séries d'images de pupille suivantes, les dénominations introduites étant celles qui seront utilisées par la suite :

- pupille dite *de référence* et sa série d'images de dark correspondante : pupille d'entrée sans apodiseur avec un diaphragme de 18 mm de diamètre,
- pupille dite *apodisée* et sa série d'images de dark correspondante : pupille d'entrée avec l'apodiseur et le diaphragme de 18 mm de diamètre.

La figure 6.10 indique les principales étapes du programme de détermination du profil en transmission de l'apodiseur.

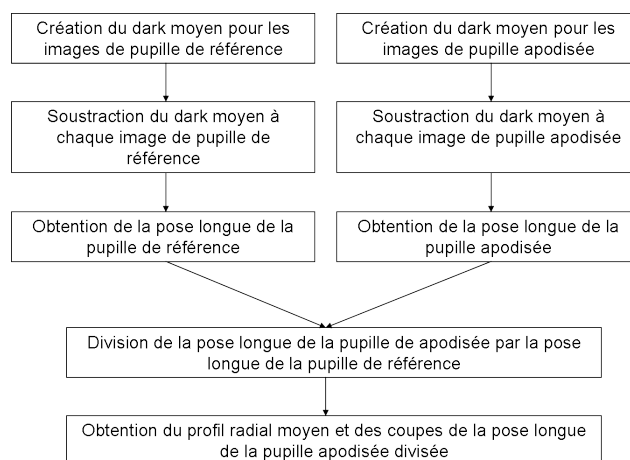


FIG. 6.10 – Etapes du programme de traitement des mesures de la transmission de l'apodiseur.

La division de la pose longue de la pupille apodisée par la pose longue de la pupille de référence permet de s'affranchir de la non-uniformité de l'éclairement de la pupille de référence mais ne permet pas de juger de la qualité absolue de la pose longue de la pupille de référence.

6.5.2 Mesures des performances coronagraphiques de l'ALC

On acquiert les séries d'images de PSF suivantes, les dénominations introduites étant celles qui seront utilisées par la suite :

- PSF dite *de référence* et sa série d'images de dark correspondante : PSF où sont montés le masque pupillaire de l'UT4 du VLT et le Lyot stop,
- PSF dite *de référence apodisée* et sa série d'images de dark correspondante : PSF où sont montés le masque pupillaire de l'UT4 du VLT, l'apodiseur et le Lyot stop,
- PSF dite *coronographiée* et sa série d'images de dark correspondante : PSF où sont montés le masque pupillaire de l'UT4 du VLT, l'apodiseur, le masque coronagraphique et le Lyot stop.

La figure 6.11 donne les principales étapes du programme d'obtention des poses longues des 3 types de PSF et de leurs profils radiaux moyens respectifs. A partir de ces dernières, il est ensuite possible d'établir les performances coronagraphiques.

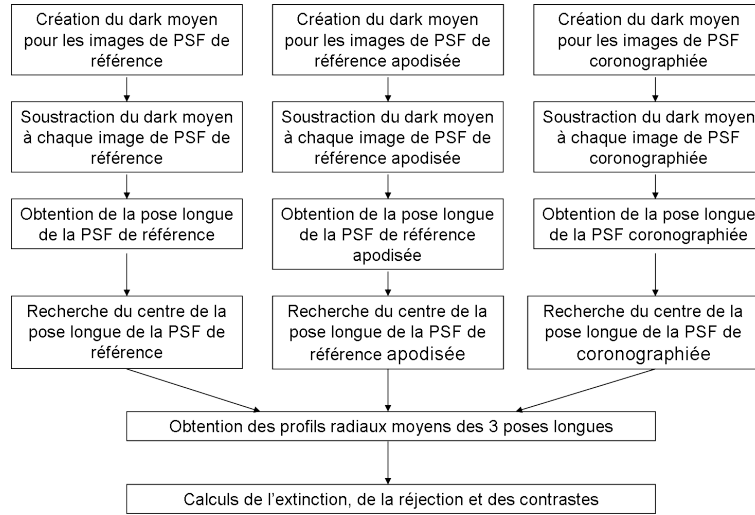


FIG. 6.11 – Etapes du programme de traitement des mesures des performances coronagraphiques de l'ALC.

6.6 Mesures

6.6.1 Mesures du profil en transmission de l'apodiseur en bande Y, J, H

Mesure en bande H :

Le masque pupillaire représentant la pupille pleine et ronde de 18 mm de diamètre est mis en place. En raison d'un nombre trop important de pixels morts de la caméra Raytheon, le système imageur de pupille utilisé est celui du LESIA : le rayon de la pupille sur le détecteur est donc réduit à 60 pixels.

La figure 6.12 présente les vues 2D et 3D des poses longues des pupilles apodisée et de référence. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de pupille non apodisée : 2 ms,
- temps d'intégration pour les images de pupille apodisée : 2 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 50.

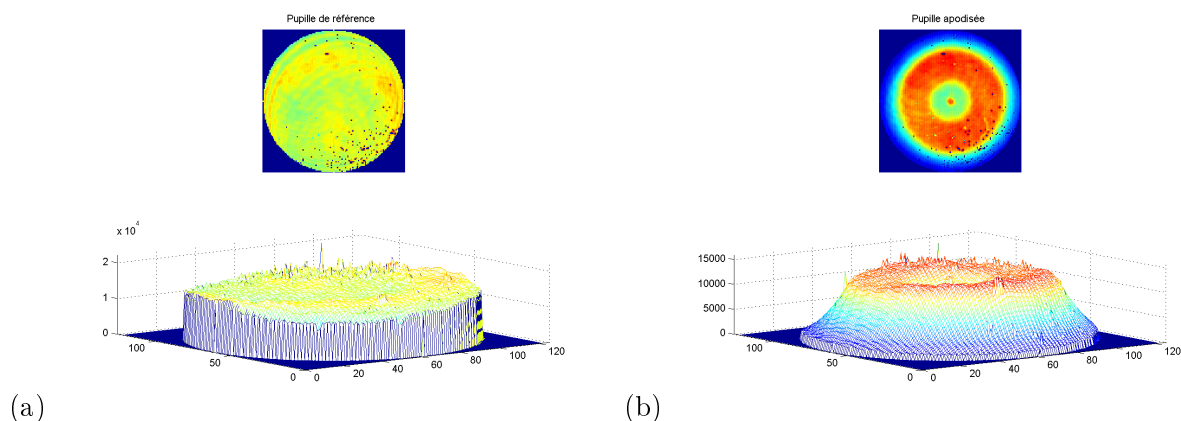


FIG. 6.12 – Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande H (temps d'intégration = 2ms, 1 pixel = $100 \mu m$).

Sur ces images pupillaires, les pixels morts du détecteur sont clairement visibles ; grâce à la division pupille apodisée/pupille de référence, ces derniers affecteront peu la détermination du profil radial moyen de l'apodiseur. L'image de la pupille non apodisée présente aussi quelques franges. La position de la pupille sur le détecteur est choisie de manière à établir un compromis entre les franges et les pixels morts. Les vues 3D montrent également que les pupilles ne sont pas éclairées uniformément.

La figure 6.13 montre les coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée ainsi que la mesure effectuée par le fabricant, Reynard Corp.

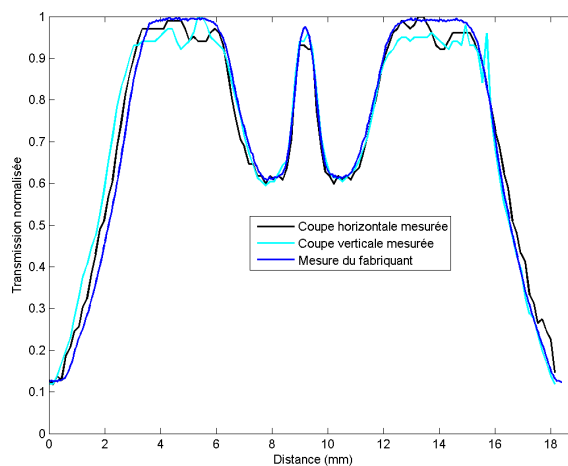


FIG. 6.13 – Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande H, comparaison avec la mesure effectuée par le fabricant.

Nous pouvons en déduire, qu'aux erreurs de mesure près, à la fois avec notre protocole expérimental (notamment la non-uniformité d'éclairage dans la pupille) qu'avec celui du fournisseur, les deux types de mesures corroborent.

Par ailleurs, la transmission globale de l'apodiseur vaut $65\% \pm 3\%$.

Mesure en bande J :

On remplace le filtre H par le filtre J devant le détecteur. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de pupille non apodisée : 4 ms,
- temps d'intégration pour les images de pupille apodisée : 4 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 50.

Les figures 6.14 et 6.15 illustrent les résultats obtenus.

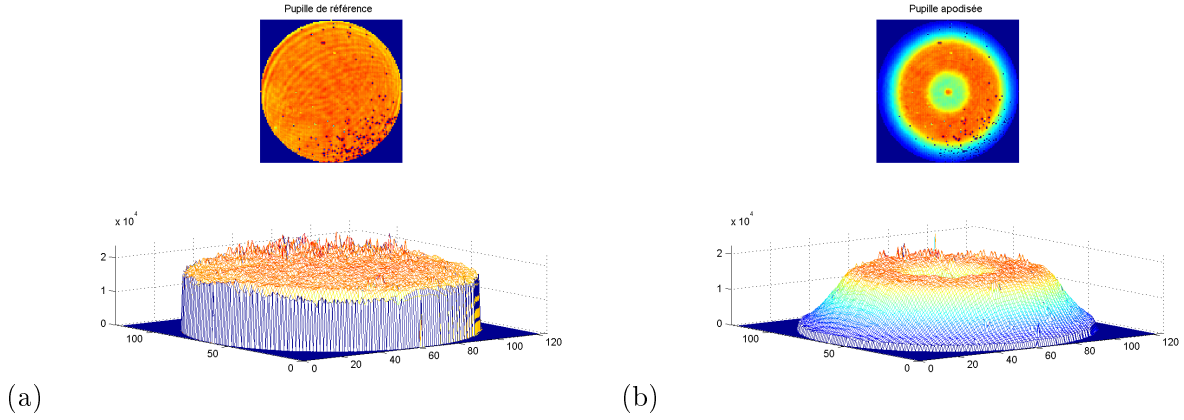


FIG. 6.14 – Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande J.

Nous pouvons faire les mêmes remarques que pour les mesures en bande H.

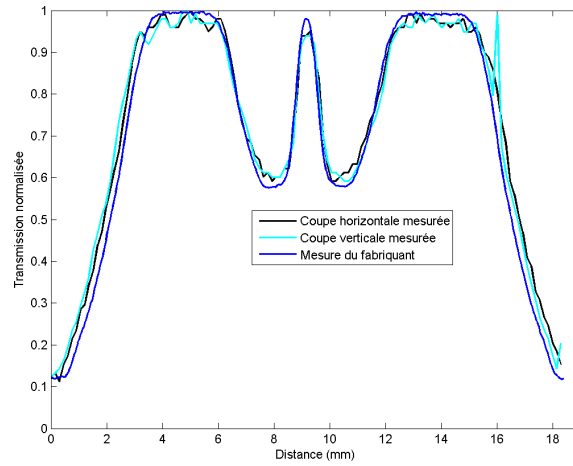


FIG. 6.15 – Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande J, comparaison avec la mesure effectuée par le fabriquant.

De plus, la transmission globale de l'apodiseur est de $65\% \pm 3\%$.

Mesure en bande Y :

On place le filtre Y devant le détecteur. On ajuste l'intensité de la source super-continuum en tournant le potentiomètre et on ajuste le temps d'intégration de manière à utiliser au mieux la dynamique du détecteur. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de pupille non apodisée : 2 ms,
- temps d'intégration pour les images de pupille apodisée : 2 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 50.

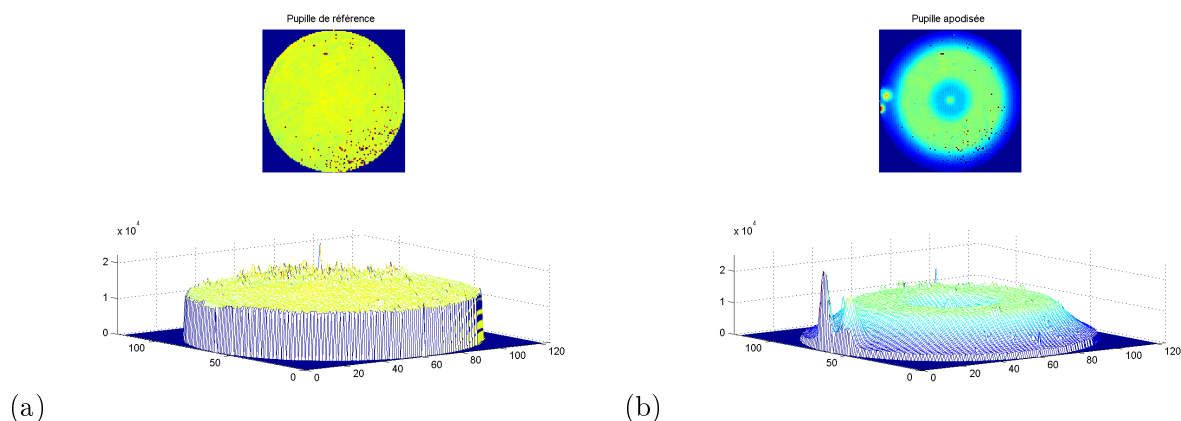


FIG. 6.16 – Vues 2D et 3D des poses longues de la pupille de référence (a) et de la pupille apodisée (b) en bande Y.

Comme pour les autres bandes spectrales, les vues 2D et 3D des pupilles apodisées et de référence sont visibles sur la figure 6.16 et les coupes de la pupille apodisée divisée le sont sur la figure 6.17.

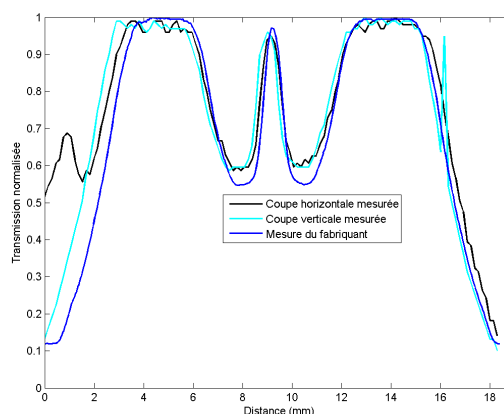


FIG. 6.17 – Coupes horizontales et verticales de la pupille apodisée divisée en bande Y, comparaison avec la mesure effectuée par le fabricant.

La pose longue de la pupille apodisée présente un ghost important sur la gauche. La présence de ghost va légèrement biaiser notre étude : en effet, la valeur de la transmission globale de l'apodiseur va être surévaluée et le profil radial moyen de transmission de l'apodiseur sera surestimé pour les rayons où le ghost est présent.

De plus, on peut voir sur les coupes la présence d'un écart entre mes mesures et celles du fabricant au niveau des creux de transmission du bagel à savoir dans les zones [7mm - 9 mm] et [9.5 mm - 11.5 mm]

Enfin, la transmission globale de l'apodiseur est de $67\% \pm 2\%$. Cette valeur, supérieure à celles obtenues en bandes J et H, est due à la présence du ghost. On peut estimer qu'en l'absence du ghost, la valeur du coefficient de transmission global de l'apodiseur serait elle aussi de 65%.

Conclusion :

La figure 6.18 montre les profils radiaux moyens de transmission de l'apodiseur en bande Y,J et H calculés sur les pupilles apodisées divisées.

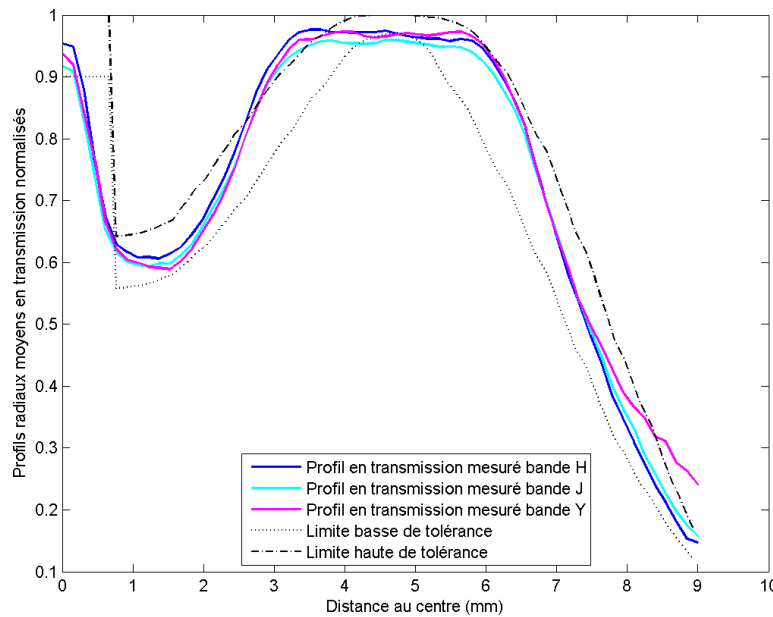


FIG. 6.18 – Profils radiaux moyens de la transmission de l'apodiseur en bande Y,J et H.

A partir de ces résultats nous pouvons établir les conclusions suivantes :

- les coupes mesurées sont en accord avec celles mesurées par Reynard Corporation,
- les trois profils sont hors spécification dans la zone comprise entre 2.6 mm et 3.7 mm à partir du centre de l'apodiseur,
- pour le profil en transmission en bande Y, la transmission dépasse aussi la limite de tolérance supérieure au niveau des bords de la pupille (ceci est majoritairement dû à la présence du ghost),
- ces mesures confirment l'achromaticité de l'apodiseur des bandes Y à H et valident le choix de l'inconel 600 comme matériau déposé pour fabriquer l'apodiseur.

En raison du non respect des limites de tolérance nous avons trouvé utile d'étudier l'effet de cette divergence dans les conditions opérationnelles de SPHERE en présence de résidus atmosphériques et d'aberrations. Les résultats des simulations sont présentés par la suite.

Simulation des performances réelles du prototype actuel d'apodiseur sur l'instrument SPHERE :

Les simulations ont été effectuées dans le mode d'observation principal de SPHERE dans les bandes H2H3 en prenant les paramètres par défaut qui ont été décrits en 5.4 du chapitre 5.

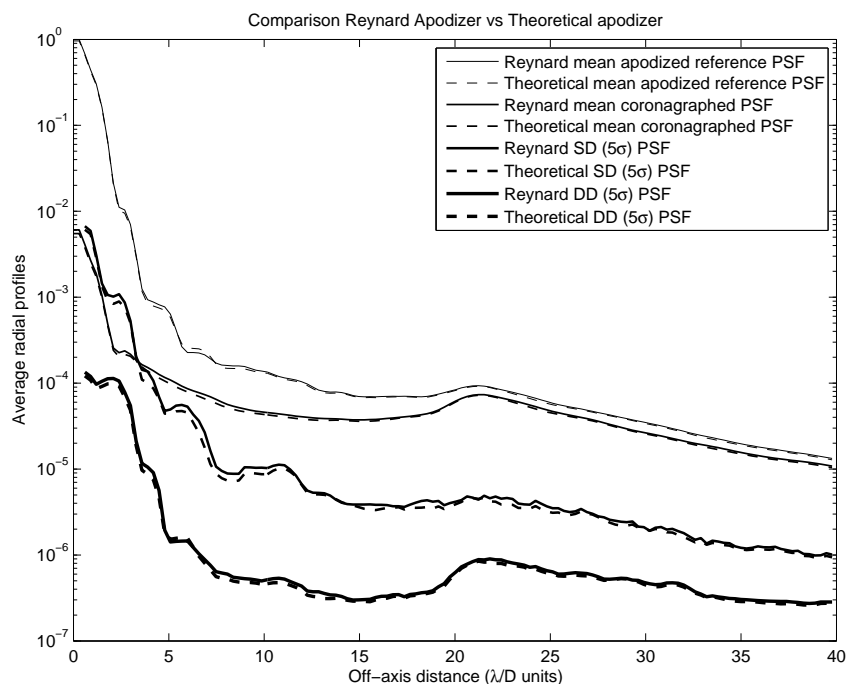


FIG. 6.19 – Comparaison des performances de l'ALC sur l'instrument SPHERE avec l'apodiseur théorique et l'apodiseur fabriqué avec résidus atmosphériques et aberrations statiques. SD= Simple Difference, DD=Double Difference.

Sur cette figure, les PSF coronographiées obtenues avec les apodiseurs idéal et réel sont confondues que l'on considère les PSF brutes ou après imagerie différentielle.

L'erreur de transmission de l'apodiseur du prototype ne sera donc pas le facteur limitant les performances de l'ALC sur l'instrument SPHERE.

6.6.2 Mesures des performances coronagraphiques en bande Y, J et H

6.6.2.1 Mesure en bande H

Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de PSF de référence non apodisée : 1 ms,
- temps d'intégration pour les images de PSF de référence apodisée : 1.5 ms,
- temps d'intégration pour les images de PSF coronographiée : 300 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 30.

La figure 6.20 montre les poses longues obtenues ainsi que les profils radiaux moyens résultants comparés aux profils théoriques obtenus par simulation.

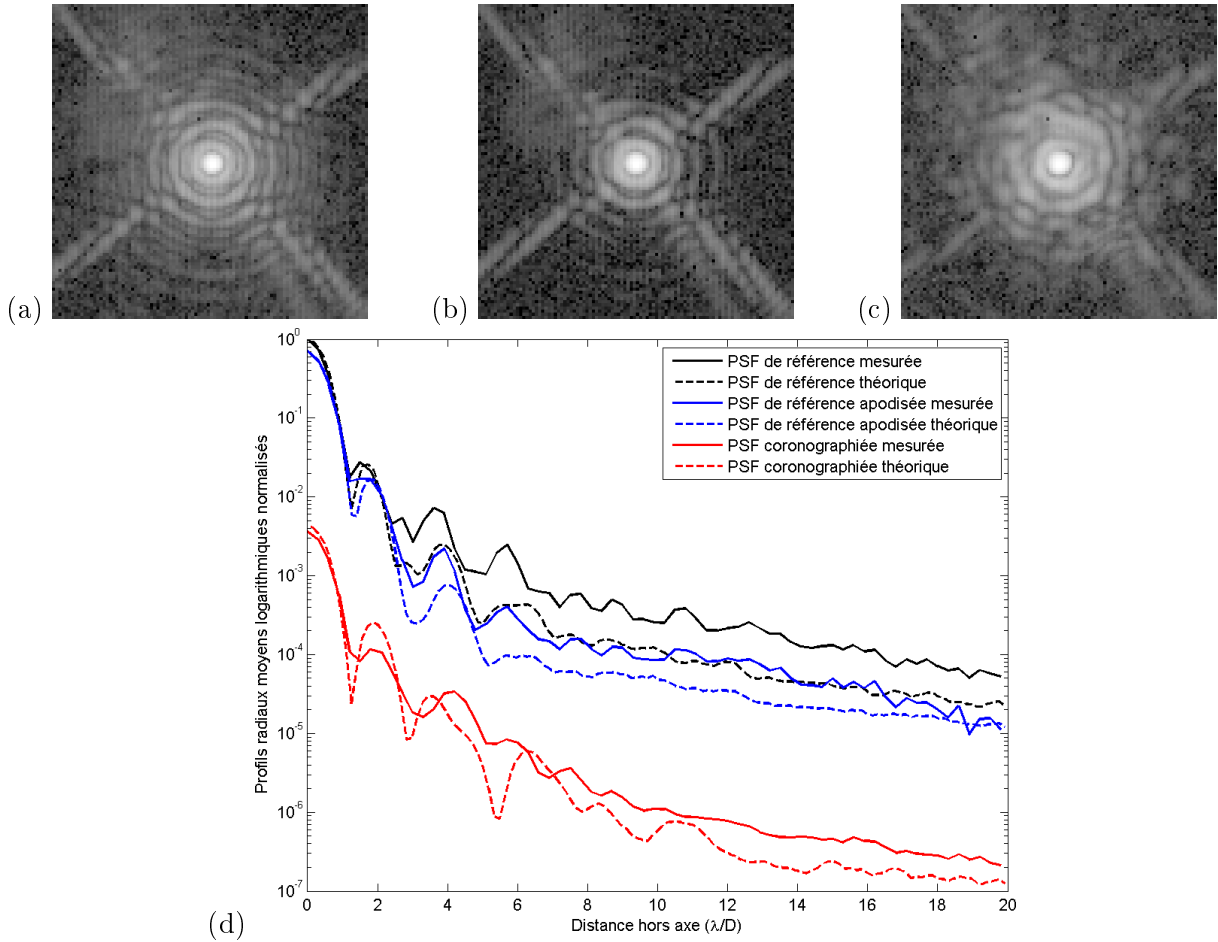


FIG. 6.20 – (a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) Profils radiaux moyens des PSF en bande H : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillés correspondent aux données simulées numériquement.

Sur les images 2D, l'échelle des niveaux de gris a été modifiée afin d'améliorer le contraste et la visibilité. L'effet de l'apodiseur est clairement visible sur les PSF de référence avec l'élargissement du pic central de la PSF apodisée et le décalage des anneaux entre les PSF de référence avec et sans apodiseur. De plus, pour une distance hors-axe supérieure à $2\lambda/D$, un offset en intensité et un manque de dynamique sont visibles entre les PSF de référence mesurées et simulées. Ceci est dû aux aberrations introduites par le banc coronagraphique qui ne sont pas prises en compte dans

la simulation : par exemple, l'apodiseur ne respecte pas la spécification sur le scratch/dig et de plus un ghost d'une araignée est présent en bas à droite. Ce décalage entre théorie et expérience est moins apparent sur les PSF coronographiés. De plus, nous pouvons voir sur les images 2D que les PSF ne sont pas à symétrie radiale ; ceci affecte localement le niveau d'intensité des profils radiaux moyens pour une distance hors-axe donnée.

La table 6.9 recense les performances coronographiques obtenues.

	Expérience	Simulation
Extinction par rapport à la PSF de référence non apodisée	274	231
Extinction par rapport à la PSF de référence apodisée	195	151
Réjection par rapport à la PSF de référence non apodisée	199	162
Réjection par rapport à la PSF de référence apodisée	138	111

TAB. 6.9 – Extinction et réjection de l'ALC en bande H obtenues expérimentalement et par simulation.

Les performances obtenues sont supérieures aux valeurs obtenues par simulation. Ceci est dû aux biais instrumentaux ainsi qu'aux artefacts de mesure qui seront présentés dans la section 6.6.6. Néanmoins, l'ordre de grandeur est respecté validant ainsi les composants.

6.6.2.2 Mesure en bande J

Pour cette mesure, on change uniquement le filtre spectral placé devant le détecteur par souci de rapidité lors de la mesure et pour mesurer la performance en observation polychromatique, l'instrument étant optimisé pour la bande H. La mesure effectuée étudie la performance de l'ALC en bande J sous les conditions suivantes qui reproduisent une condition d'observation possible avec l'instrument SPHERE :

- un apodiseur dont la transmission a été optimisée pour un masque coronagraphique de diamètre angulaire $4\lambda/D$,
- un masque coronagraphique de diamètre angulaire $4\lambda/D$ à $\lambda = 1.6\mu m$ c'est-à-dire de diamètre angulaire $5.55\lambda/D$ en bande J,
- un Lyot stop dont la forme a été optimisée pour un masque coronagraphique $4\lambda/D$ à $\lambda = 1.6\mu m$.

Sous ces conditions, on obtient par simulations numériques les données suivantes :

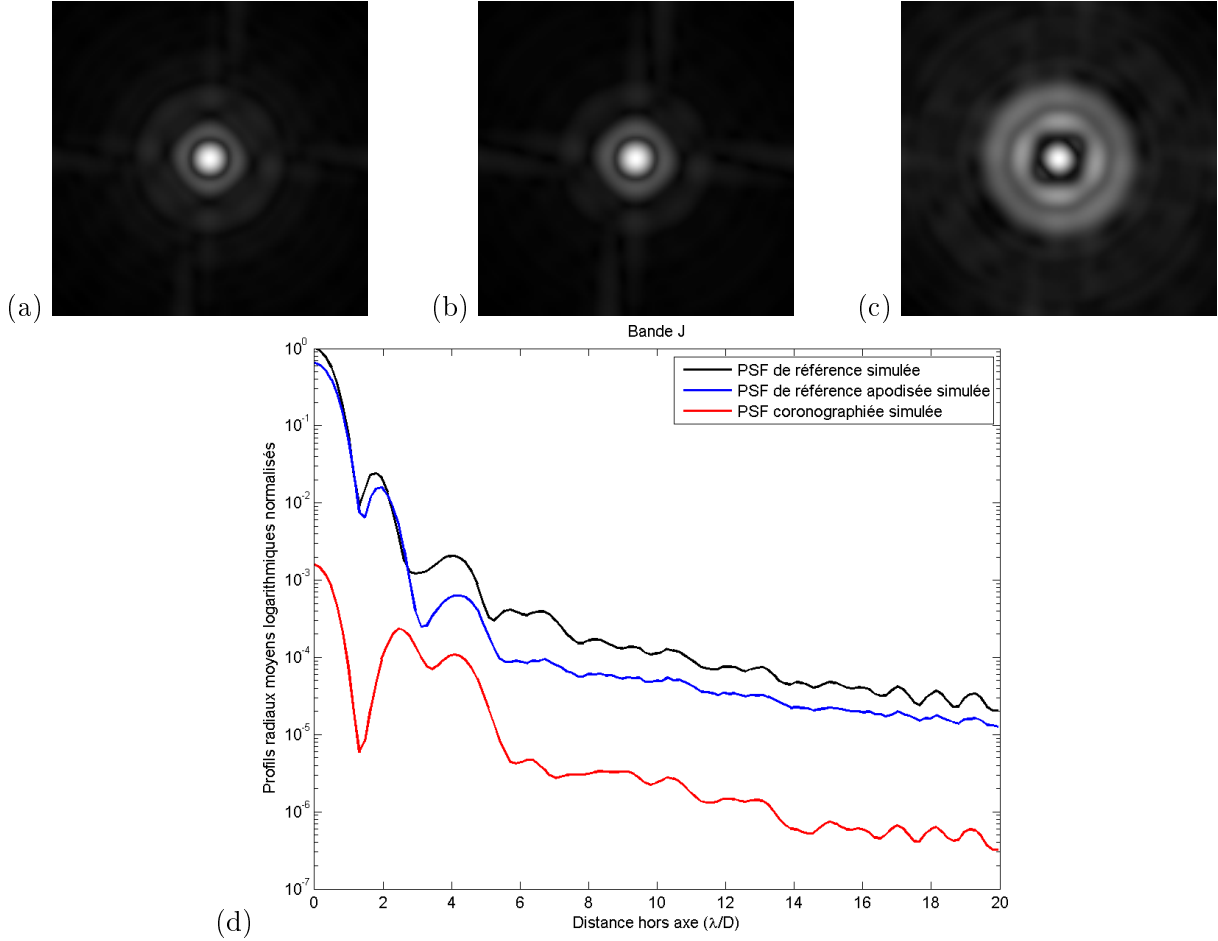


FIG. 6.21 – Simulation des PSF obtenues avec l'ALC $4\lambda/D$ en bande J : (a) image de la PSF de référence non apodisée, (b) image de la PSF de référence apodisée, (c) image de la PSF coronagraphiée, (d) profils radiaux moyens de ces PSF.

En ce qui concerne les mesures, les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de PSF de référence non apodisée : 1 ms,
- temps d'intégration pour les images de PSF de référence apodisée : 1.5 ms,

- temps d'intégration pour les images de PSF coronographiée : 850 ms,
 - nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 30.
- Les résultats de ces mesures sont donnés sur la figure 6.22.

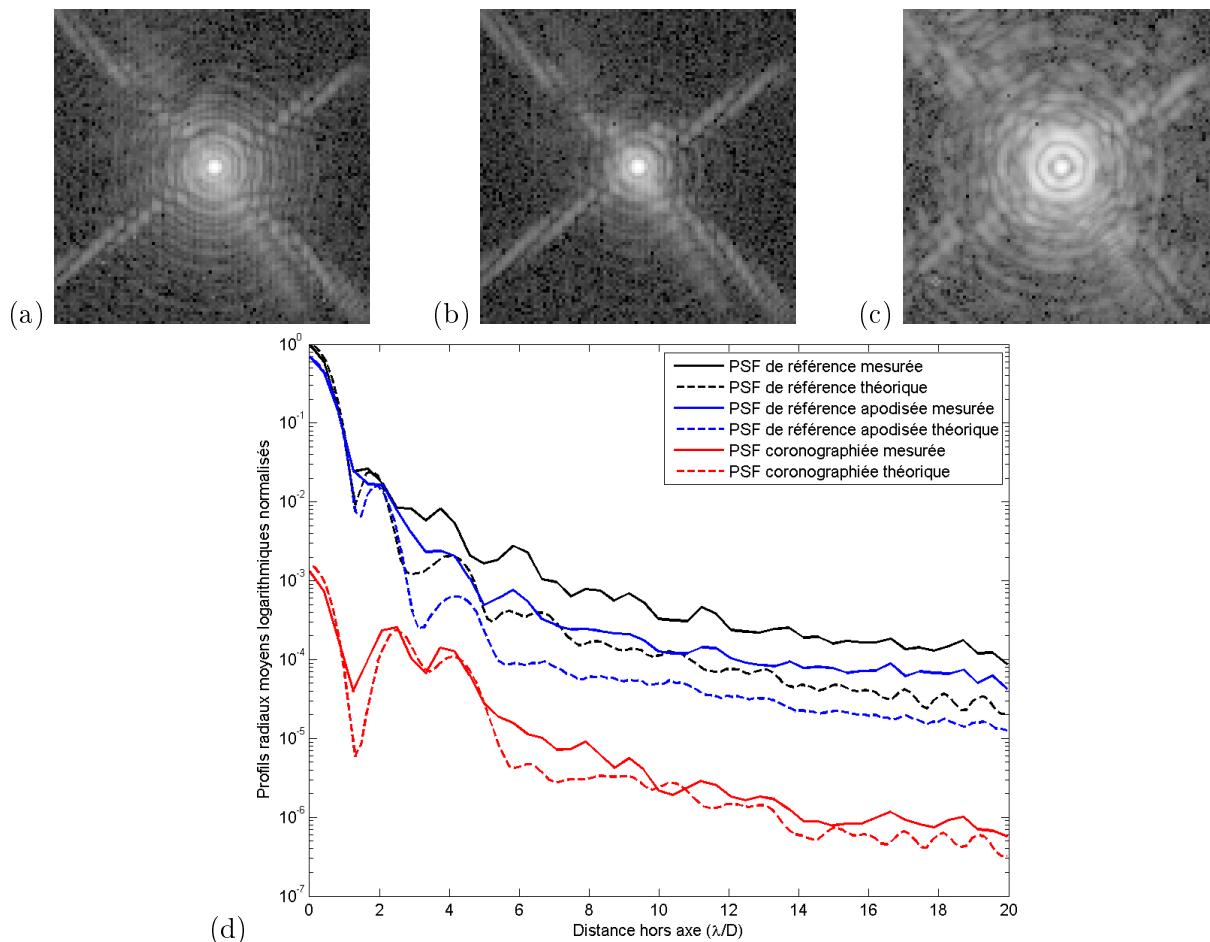


FIG. 6.22 – (a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens des PSF en bande J : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillés correspondent aux données simulées numériquement.

On peut voir qu'il y a le même décalage entre les PSF de référence mesurées et simulées qu'en bande H. Néanmoins l'allure des PSF mesurées est cohérente avec les simulations. Les deux araignées localisées en haut à gauche et en bas à droite sont dédoublées en raison d'un ghost. La table 6.10 recense les performances coronagraphiques obtenues.

	Expérience	Simulation
Extinction par rapport à la PSF de référence non apodisée	832	628
Extinction par rapport à la PSF de référence apodisée	526	409
Réjection par rapport à la PSF de référence non apodisée	191	148
Réjection par rapport à la PSF de référence apodisée	120	101

TAB. 6.10 – Extinction et réjection de l'ALC en bande J obtenues expérimentalement et par simulation.

6.6.2.3 Mesure en bande Y

De nouveau, c'est uniquement le filtre spectral qui a été changé par rapport à la mesure précédente. Dans ce cas, le diamètre du masque coronagraphique utilisé correspond à un masque de diamètre angulaire $6.2\lambda/D$ pour la bande spectrale Y considérée. Les simulations numériques de l'ALC sous ces conditions fournissent les résultats suivants :

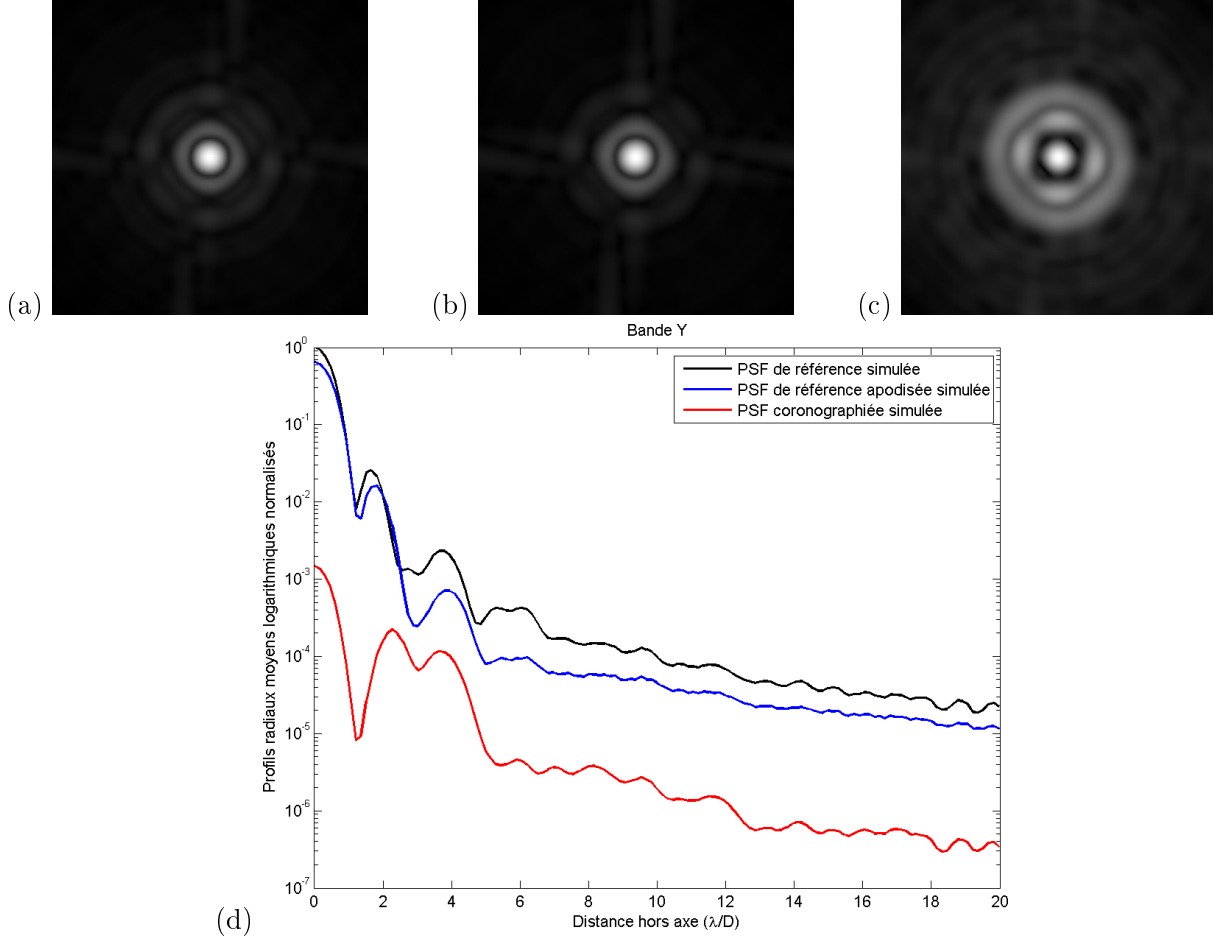


FIG. 6.23 – Simulation des PSF obtenues avec l'ALC $4\lambda/D$ en bande Y : (a) image de la PSF de référence non apodisée, (b) image de la PSF de référence apodisée, (c) image de la PSF coronagraphiée, (d) profils radiaux moyens de ces PSF.

Pour les mesures, les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de PSF de référence non apodisée : 1 ms,
- temps d'intégration pour les images de PSF de référence apodisée : 1.5 ms,
- temps d'intégration pour les images de PSF coronagraphiée : 850 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 30.

Les vues 2D ainsi que les profils radiaux moyens des PSF résultantes sont représentés sur la figure 6.24.

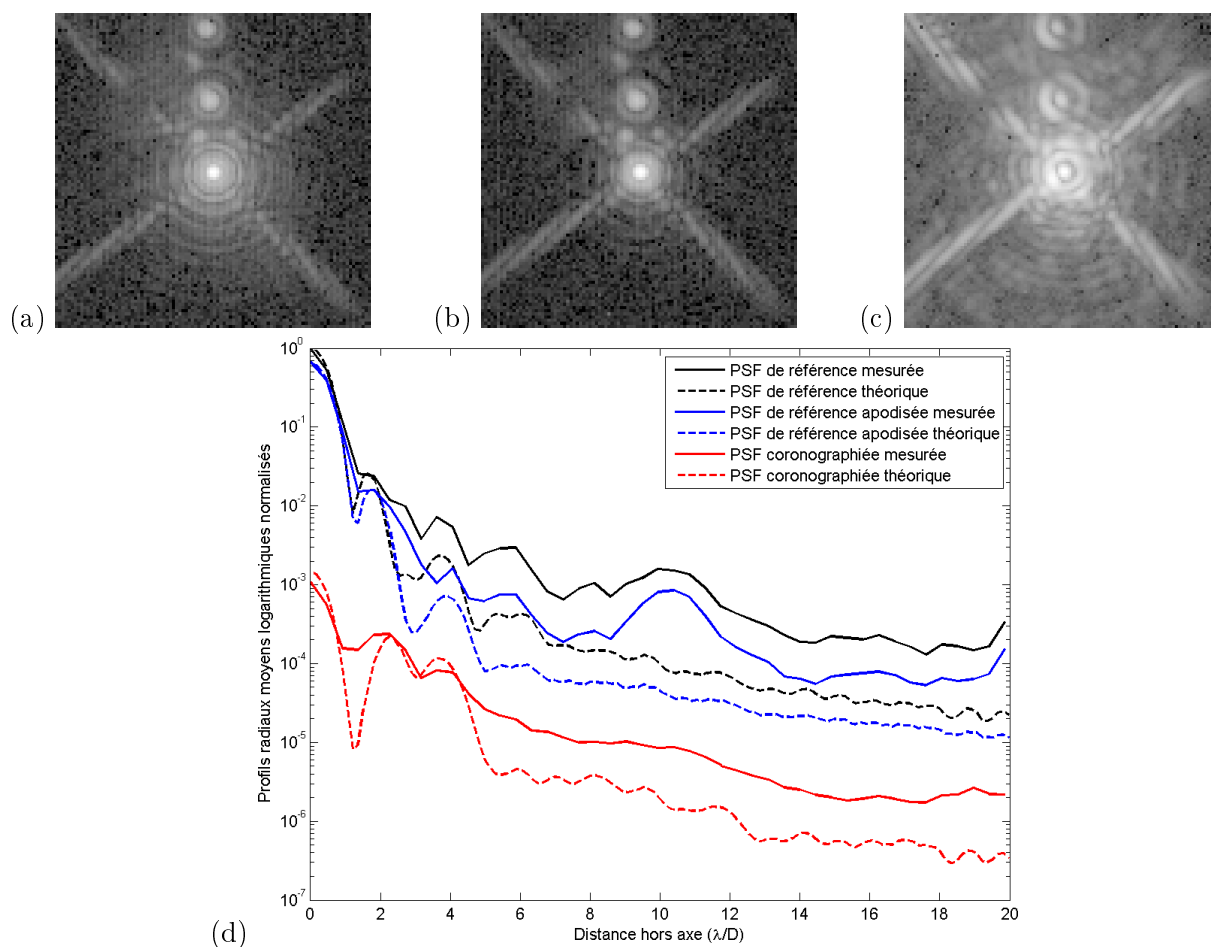


FIG. 6.24 – (a) PSF de référence, (b) PSF de référence apodisée, (c) PSF coronographiée, (d) profils radiaux moyens des PSF en bande Y : les courbes pleines correspondent aux données mesurées, les courbes en pointillées correspondent aux données simulées numériquement.

Sur toutes les images 2D, nous pouvons voir clairement la présence de plusieurs ghosts. Ces ghosts sont introduits par des réflexions multiples introduites entre le filtre et le hublot du détecteur. Il n'a malheureusement pas été possible de faire disparaître ces ghosts. Hormis encore une fois l'écart en dynamique des PSF de référence, l'allure des PSF mesurées corrobore avec les simulations. La table 6.11 recense les performances coronographiques obtenues.

	Expérience	Simulation
Extinction par rapport à la PSF de référence non apodisée	930	674
Extinction par rapport à la PSF de référence apodisée	624	439
Réjection par rapport à la PSF de référence non apodisée	183	155
Réjection par rapport à la PSF de référence apodisée	112	106

TAB. 6.11 – Extinction et réjection de l'ALC en bande Y obtenues expérimentalement et par simulation.

6.6.2.4 Synthèse

La table 6.12 présente une synthèse des résultats expérimentaux obtenus par rapport aux attentes du consortium pour les coronographes de SPHERE.

	Bande Y	Bande J	Bande H
Atténuation du pic central de la PSF	930	834	274
Gain en terme de contraste de PSF	20	21	24
Transmission hors-axe incluant le Lyot stop	61.2%	58.5 %	58.5%

TAB. 6.12 – Vue d'ensemble des performances de l'ALC.

Ces résultats remplissent les spécifications sur les coronographes requises par l'instrument SPHERE.

6.6.3 Mesures de sensibilité du coronographe au déplacement latéral de ces composants en bande H

Dans cette partie je m'intéresse à l'étude de la sensibilité du coronographe au déplacement latéral de ces composants en bande H. Pour ce faire, on écarte l'apodiseur, le masque coronographique et le Lyot stop de leur position nominale et on étudie l'effet résultant sur les PSFs coronographiées ainsi que sur l'évolution des taux d'extinction et de réjection.

6.6.3.1 Sensibilité au déplacement latéral de l'apodiseur

L'apodiseur est décalé horizontalement de sa position nominale de de 0 à 1.5 mm. La figure 6.25 montre l'effet de ce déplacement de l'apodiseur sur les PSF coronographiées.

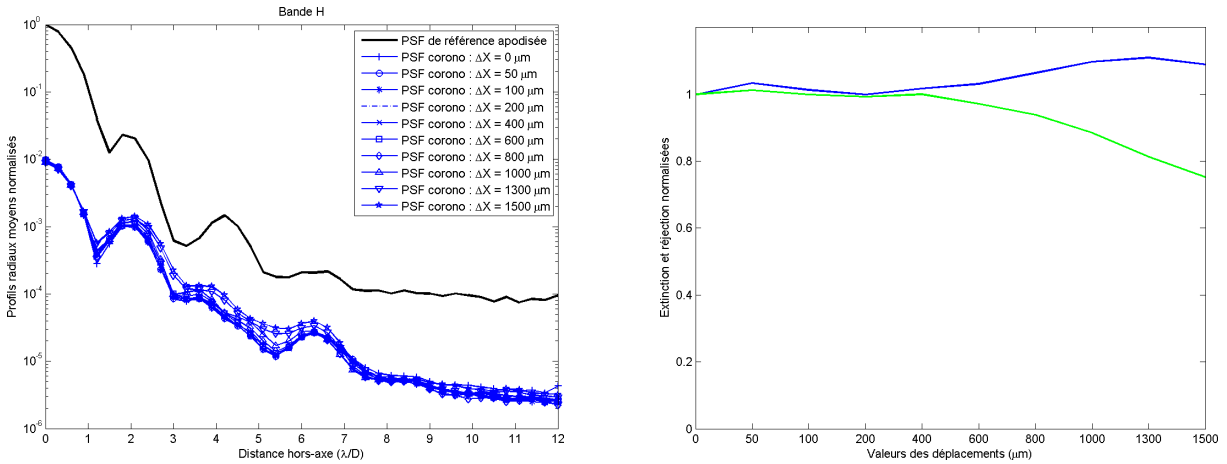


FIG. 6.25 – Effet du déplacement latéral de l'apodiseur le long de l'axe X : (gauche) profils des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔX de l'apodiseur, de 0 à 1.5 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

La quasi-superposition des PSF témoigne de la faible sensibilité de l'ALC au décalage de l'apodiseur. Les premiers effets importants sur les profils radiaux apparaissent pour un décalage

d'1mm où une légère remontée d'énergie est visible entre 3 et 6 λ/D . De plus, si l'on considère l'évolution des taux d'extinction et de réjection, les deux courbes s'écartent de la valeur nominale pour des déplacements strictement supérieurs à $\pm 400 \mu\text{m}$. On en déduit une valeur de tolérance de $\pm 500 \mu\text{m}$.

En outre, nous pouvons remarquer qu'à partir de $\Delta X = 1300 \mu\text{m}$ le pic de transmission central de l'apodiseur n'est plus masqué par l'obstruction centrale du masque pupillaire et de ce fait il y a réinjection d'énergie ce qui explique les remontées des intensités des 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} anneaux des PSFs.

6.6.3.2 Sensibilité au déplacement latéral du masque coronographique

La figure 6.26 montre l'effet du déplacement vertical du masque coronographique de 0 à 50 μm par pas de 10 μm .

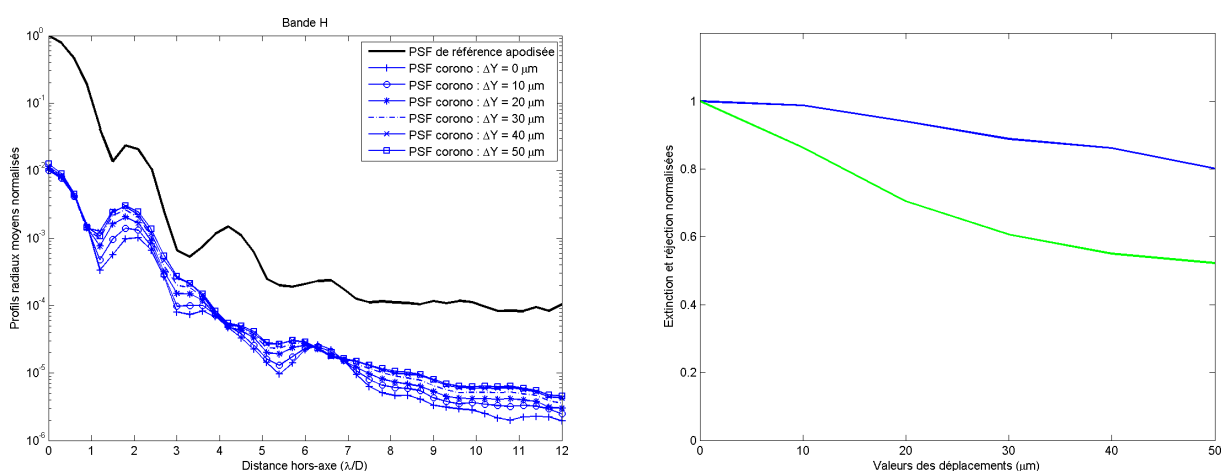


FIG. 6.26 – Effet du déplacement latéral du masque coronographique le long de l'axe Y : (gauche) profils des PSF coronographiés pour plusieurs déplacements ΔY du masque coronographique, de 0 à 50 μm par pas de 10 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

Comme on pouvait s'y attendre, les performances coronographiques sont très sensibles au décentrage du masque coronographique : ceci se traduit principalement par une forte diminution de la réjection du coronographe qui se répercute au niveau des profils des PSFs par des remontées des intensités des 2^{ème} et 3^{ème} anneaux ainsi que des ailes.

En ce qui concerne la détermination d'une tolérance, cette dernière est inférieure à 10 μm puisqu'à cette valeur la réjection vaut déjà 80 % la valeur maximale et la PSF coronographiée a commencé à s'écarter de la PSF nominale. Une tolérance de $\pm 5 \mu\text{m}$ sur le centrage du masque coronographique semblerait être appropriée.

Détermination de l'angle minimal de détection (IWA ou Inner Working Angle)

Une mesure corollaire à la détermination de la tolérance sur le centrage du masque coronographique est la détermination de l'angle minimal de détection ou IWA.

Pour ce faire, on décale latéralement le masque coronographique de sa position nominale et on mesure la transmission de l'étoile par rapport au cas hors-axe. L'IWA est donné par une transmission de 50%. La différence avec la mesure précédente est la valeur des déplacements du masque coronographique par rapport à l'axe optique qui sont plus grandes puisqu'il faut que le masque coronographique soit suffisamment décentré.

Tout d'abord, afin de déterminer la plage de décentrage du masque coronographique à balayer, on effectue plusieurs décalages importants du masque coronographique et on détermine la transmission : il est ainsi apparu qu'une transmission de 50% est obtenue quand le masque coronographique est décentré d'une valeur légèrement supérieure à un rayon du masque.

Ainsi des mesures pour des déplacements du masque coronographique comprises entre 1 et 1.5 rayons du masque par pas de 0.1 rayon ont été faites : ceci correspond à des valeurs physiques de décalages de 133 μm , 146 μm , 160 μm , 173 μm , 186 μm et 199 μm .

La figure 6.27 montre les PSF coronographiées résultantes.

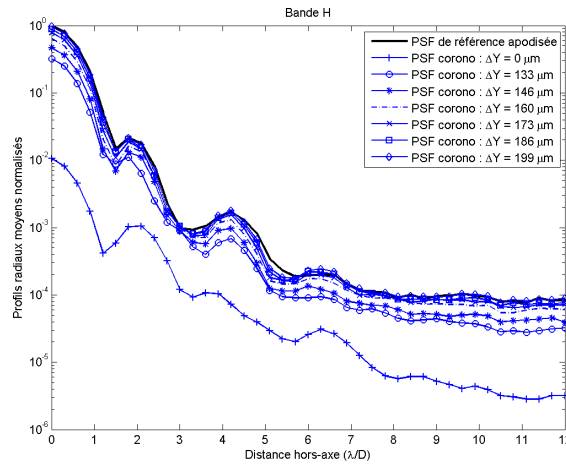


FIG. 6.27 – Détermination de l'angle minimal de détection : profil de la PSF de référence apodisée et des PSF coronographiées pour plusieurs déplacements ΔY du masque coronographique.

La figure 6.28 montre l'évolution la transmission de l'étoile par rapport au cas hors-axe correspondant aux déplacements effectués.

Nous pouvons voir sur la figure que la valeur de la transmission augmente de manière brutale notamment dans la zone où le masque coronographique est décalé de 1 à 1.2 rayon du masque (ce qui correspond à une plage de décalage de 25 microns) en variant de 40% à 65%.

De plus, il est possible de déterminer la valeur de l'IWA : elle est de 1.15 rayon du masque soit 153 μm ou 2.29 λ/D .

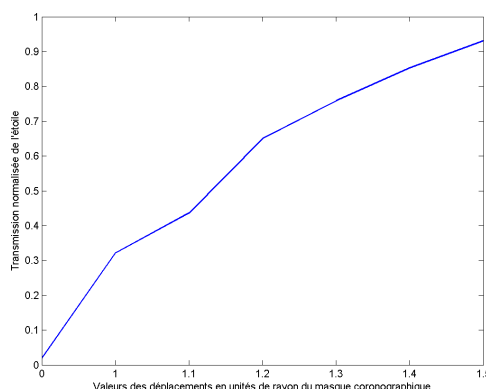


FIG. 6.28 – Détermination de l'angle minimal de détection : évolution de la transmission de l'étoile par rapport au cas hors-axe (non coronographié) en fonction de la valeur du déplacement.

6.6.3.3 Sensibilité au déplacement latéral du diaphragme de Lyot

La figure 6.29 montre l'effet du décalage horizontal du Lyot stop sur les PSF coronographiés.

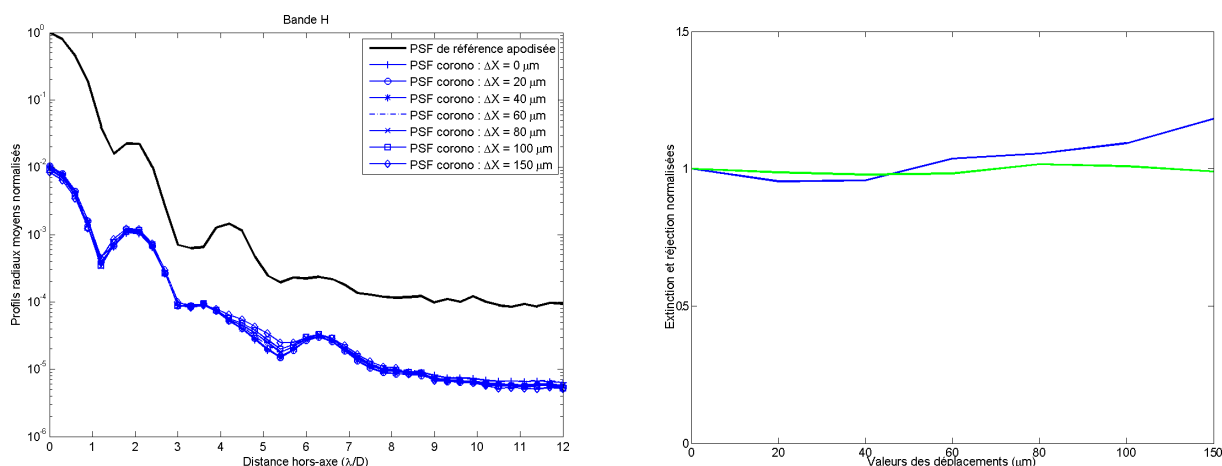


FIG. 6.29 – Effet du déplacement latéral du Lyot stop le long de l'axe X : (gauche) profils des PSF coronographiés pour plusieurs déplacements ΔX du Lyot stop, de 0 à 150 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

Il apparaît une faible sensibilité au déplacement latéral du Lyot stop : celle-ci ne se traduit que par une légère remontée des profils entre $3.5 \lambda/D$ et $5.5 \lambda/D$. A partir des courbes d'évolution des performances, nous pouvons estimer la valeur de la tolérance à $\pm 70 \mu\text{m}$.

De plus, puisque la forme du Lyot stop n'est pas à symétrie axiale en raison de la présence des araignées, il est nécessaire d'effectuer la même mesure selon l'autre direction latérale. Les résultats de mesure sont donnés sur la figure 6.30.

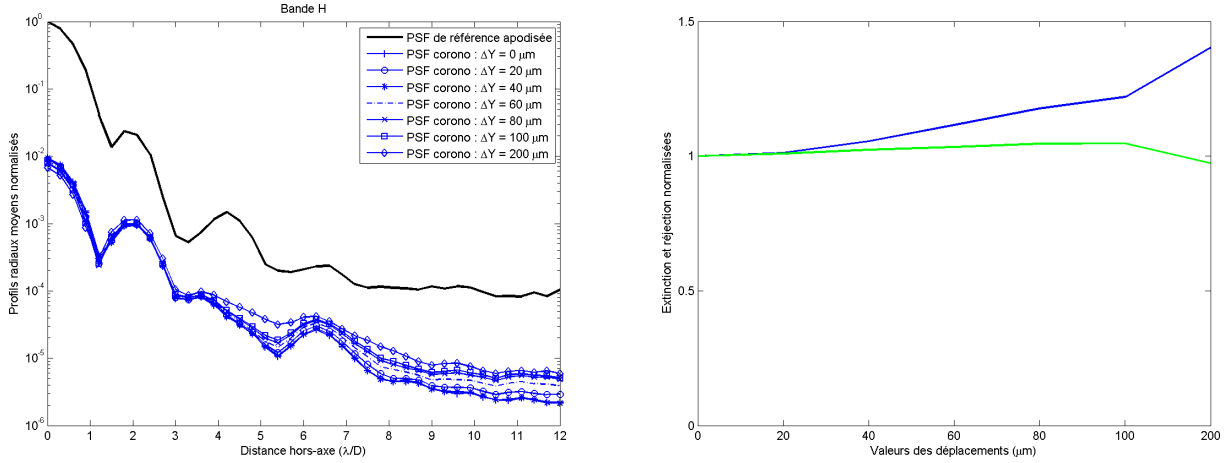


FIG. 6.30 – Effet du déplacement latéral du Lyot stop le long de l'axe Y : (gauche) profils des PSF coronagraphiés pour plusieurs déplacements ΔY du Lyot stop, de 0 à 200 μm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

Dans ce cas, la dégradation des performances coronagraphiques est plus sensible : dès un décalage de 20 μm , le profil de la PSF coronagraphiée se démarque de la courbe nominale.

Nous pouvons déterminer une valeur de la tolérance de $\pm 40 \mu m$.

6.6.4 Mesures de sensibilité du coronographe à la défocalisation de ces composants en bande H

Les mesures de sensibilité des performances de l'ALC à la défocalisation de ces composants ont été effectuées en bande H avec le masque coronagraphique de diamètre angulaire $4\lambda/D$.

6.6.4.1 Sensibilité au défocus de l'apodiseur

L'apodiseur est défocalisé de 0 à 5 mm par pas de 0.5 mm. La position 0 mm correspond à celle où l'apodiseur est dans le plan pupille ou aussi près que possible. La figure 6.31 montre l'effet de ce déplacement de l'apodiseur sur les PSF coronagraphiés.

L'allure relativement similaire de toutes les courbes montre que l'ALC est presque insensible à un déplacement de l'apodiseur inférieur à 5 mm. L'unique variation est visible par une remontée de l'intensité des ailes de la PSF : quelques dixièmes de mm induisent une perte de contraste de l'ordre de $0.1 \cdot 10^{-5}$ pour des séparations angulaires supérieures à $8\lambda/D$. Ce phénomène nous amène à définir une tolérance de $\pm 2.5 mm$.

6.6.4.2 Sensibilité à la défocalisation du masque coronagraphique

La figure 6.32 montre l'effet de la défocalisation du masque coronagraphique sur les PSF coronagraphiés pour des valeurs de déplacement comprises entre -1mm et 3mm. Les valeurs de déplacement ne sont pas symétriques en raison d'une butée mécanique.

Il apparaît sur les courbes que les plus grands déplacements conduisent à réinjecter de l'énergie lumineuse dans les 2^{ème} et 3^{ème} anneaux d'Airy ainsi que dans les ailes de la PSF. La tolérance est de $\pm 1 mm$.

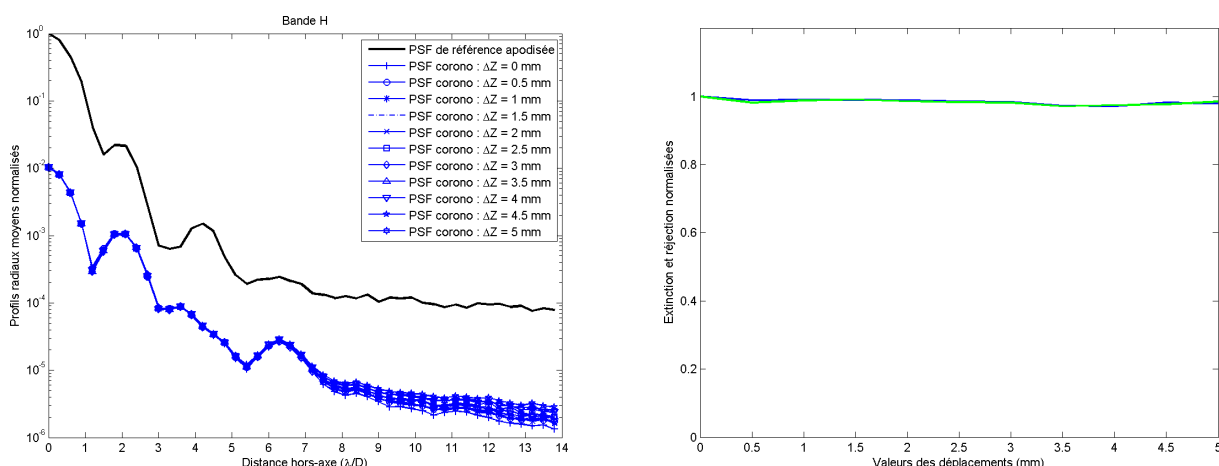


FIG. 6.31 – Effet de la défocalisation de l'apodiseur : (gauche) profils des PSF coronagraphiés pour plusieurs déplacements ΔZ de l'apodiseur, de 0 à 5 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

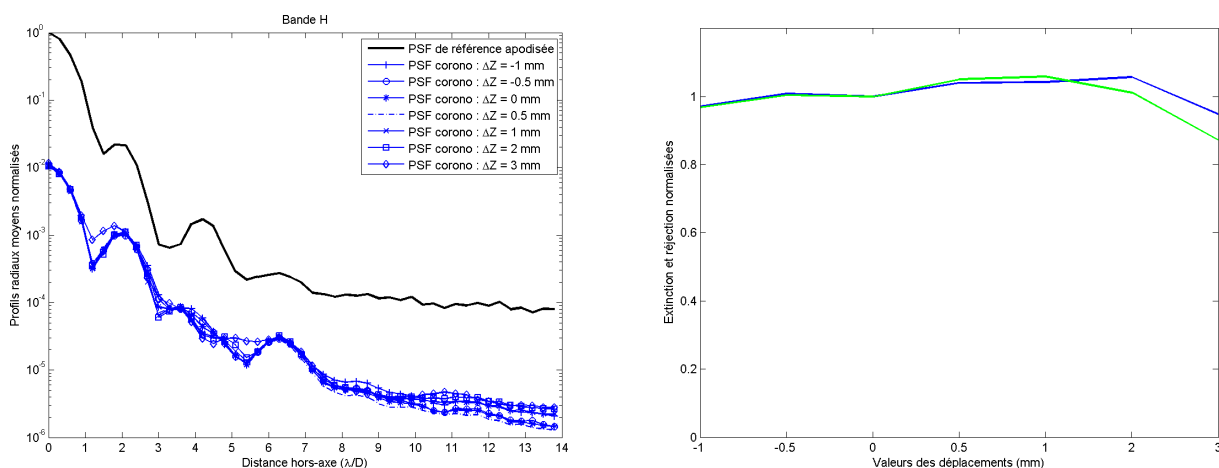


FIG. 6.32 – Effet de la défocalisation du masque coronagraphique de Lyot : (gauche) profils des PSF coronagraphiés pour plusieurs déplacements ΔZ du masque coronagraphique, de -1 à 3 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

6.6.4.3 Sensibilité à la défocalisation du Lyot stop

Le Lyot stop est défocalisé de la position nominale de -10 mm à 6 mm par pas de 2 mm. La figure 6.33 montre l'effet de cette défocalisation du diaphragme de Lyot sur les PSF coronagraphiés.

Le meilleur contraste est obtenu pour un déplacement de -2 mm. Ceci est dû au fait que la profondeur de champ de la monture du Lyot stop est trop large pour pouvoir ajuster précisément la position du Lyot stop. De plus, la non symétrie par rapport à la position nominale des courbes d'évolution est due à l'assymétrie du diaphragme de Lyot. On détermine une limite de tolérance de ± 4 mm.

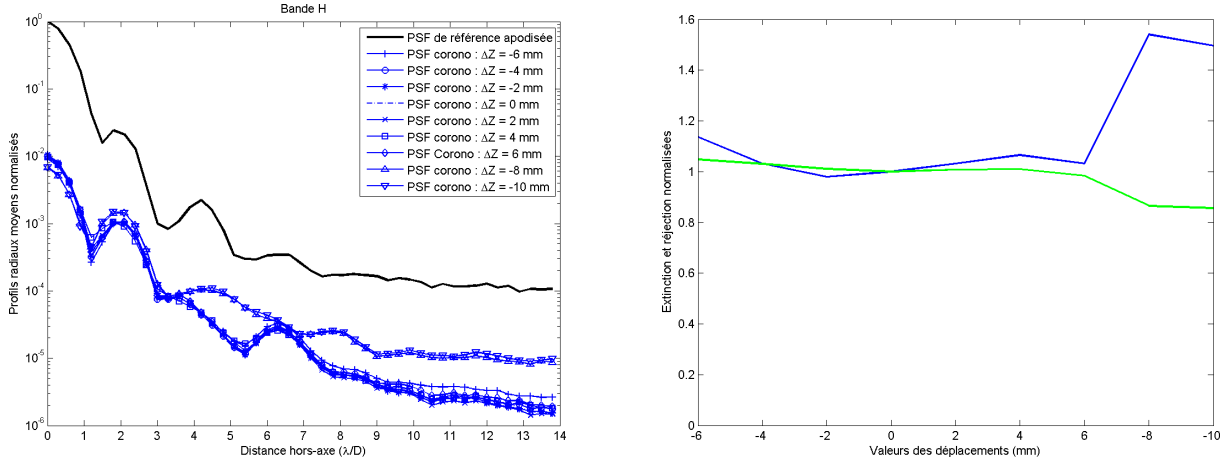


FIG. 6.33 – Effet de la défocalisation du Lyot stop : (gauche) profils des PSF coronagraphiés pour plusieurs déplacements ΔZ du masque coronagraphique, de -10 à 6 mm et (droite) évolution de l'extinction (bleu) et de la réjection (vert) en fonction de la valeur du déplacement.

6.6.5 Conclusion sur la sensibilité de l'ALC $4\lambda/D$ aux déplacements latéraux et longitudinaux de ses composants : spécifications sur leur positionnement

A partir des résultats obtenus, nous pouvons définir une estimation des tolérances à définir sur le positionnement des composants de l'ALC. D'une manière générale, nous pouvons remarquer que l'allure des évolutions de la sensibilité au déplacement latéral et à la défocalisation des composants de l'ALC $4\lambda/D$ est comparable à celle de l'ALC $3\lambda/D$.

	X	Y	Z
Apodiseur	$\pm 500 \mu\text{m}$	$\pm 500 \mu\text{m}$	$\pm 2.5 \text{ mm}$
Masque coronagraphique	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 1 \text{ mm}$
Diaphragme de Lyot	$\pm 70 \mu\text{m}$	$\pm 40 \mu\text{m}$	$\pm 4 \text{ mm}$

TAB. 6.13 – Synthèse des valeurs des tolérances sur le positionnement des composants de l'ALC $4\lambda/D$ mesurées.

6.6.6 Difficultés rencontrées

Voici la liste des problèmes rencontrés lors des missions qui ont affecté la qualité des mesures :

- non uniformité de l'éclairement de la pupille d'entrée due à des variations centre-bord et à la présence de franges d'interférences avec toutes les sources. Néanmoins, une amélioration notoire a été constatée dès la mise en place de la source super-continuum.
- variations photométriques du maximum de l'image lors de l'acquisition d'une série d'images : ceci est dû à un régime non-linéaire de la source super-continuum.
- absence de densités neutres obligeant de désolidariser les connecteurs de fibres optiques pour diminuer le flux incident
- décentrage de l'image par rapport à l'axe optique dû aux vibrations,

- présence de ghosts, ceux-ci étant créés par des réflexions parasites entre le filtre spectral et le hublot du détecteur.
- sous-échantillonnage de la PSF sur le détecteur,
- reproductibilité restreinte des mesures : deux éléments importants sont à considérer
 - le potentiomètre de la source super-continuum est non gradué rendant impossible d’avoir le même éclaircissement lors de séries de mesures non successives
 - la sensibilité du détecteur à l’environnement ambiant : d’après la thèse [48] qui traite de la caractérisation du détecteur, il apparaît que ce dernier est sensible au système de régulation de la salle blanche. Suivant les jours, la période des variations peut s’étendre d’une dizaine de minutes à plus de quarante cinq avec des amplitudes de variation allant de quelques dixièmes de pourcents à quelques pourcents. L’amplitude de la perturbation dépend de l’amplitude de la variation du taux d’humidité au cours d’un cycle de régulation. Une nouvelle dérive du signal de sortie du détecteur peut aussi apparaître s’il se produit au cours de la journée une variation du taux de CO₂.

6.7 Conclusions et perspectives

6.7.1 Premières conclusions relatives à la caractérisation de l’ALC $4\lambda/D$ dans l’IR

Je viens de présenter les résultats de caractérisation expérimentale d’un coronographe de Lyot apodisé $4\lambda/D$ dans l’infrarouge. Différents types de mesures ont été effectuées, les conclusions principales qu’elles ont permis de tirer sont :

- caractérisation de l’apodiseur :
 1. les trois profils en transmission obtenus dans les bandes Y, J et H sont hors spécification dans la zone comprise entre 2.6 mm et 3.7 mm à partir du centre de l’apodiseur bien que le dépôt ne présente pas de discontinuités majeures.
 2. le coefficient de transmission global dans les bandes Y, J et H vaut respectivement 65%, 65% et 67%.
- performances coronagraphiques de l’ALC $4\lambda/D$ dans les bandes Y, J et H : l’allure générale des PSF et l’extinction sont en accord avec les simulations ; par contre la faible dynamique du détecteur CCD et la présence de ghosts limitent fortement la réjection et la dynamique des PSF.
- estimation de la sensibilité des performances de l’ALC en fonction des déplacements longitudinaux et latéraux de ces composants en bande H : sensibilité importante aux déplacements latéraux du masque coronagraphique et du Lyot stop ainsi qu’au défocus du Lyot stop.

Par ailleurs, les spécifications sur les coronographes requises par l’instrument SPHERE sont remplies.

Ce travail a donné lieu à la rédaction d’un article intitulé "Apodized Lyot Coronagraph for VLT-SPHERE : II. Laboratory tests and performances of a first prototype in the near infrared" qui est en cours de soumission à A&A et qui est présenté en annexe.

6.7.2 Perspectives concernant la suite de la caractérisation

Les perspectives concernant la suite de la caractérisation de l'ALC IR lors des prochaines missions sont les suivantes :

- augmentation du temps de pose afin de mieux imager les anneaux des PSF de référence et d'améliorer leur dynamique.

Lors de la dernière mission et lors de la phase de réglage et d'alignement de l'ALC nous avons par hasard fait l'acquisition de PSF de référence avec et sans apodiseur avec le filtre Y avec un temps de pose largement supérieur à celui préconisé par nos collègues du LESIA, optimal dans le cas du 4QPM. La figure 6.34 montre les profils radiaux moyens des PSF de référence apodisée et non apodisée obtenues. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration pour les images de pupille non apodisée : 20 ms,
- temps d'intégration pour les images de pupille apodisée : 20 ms,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 30.

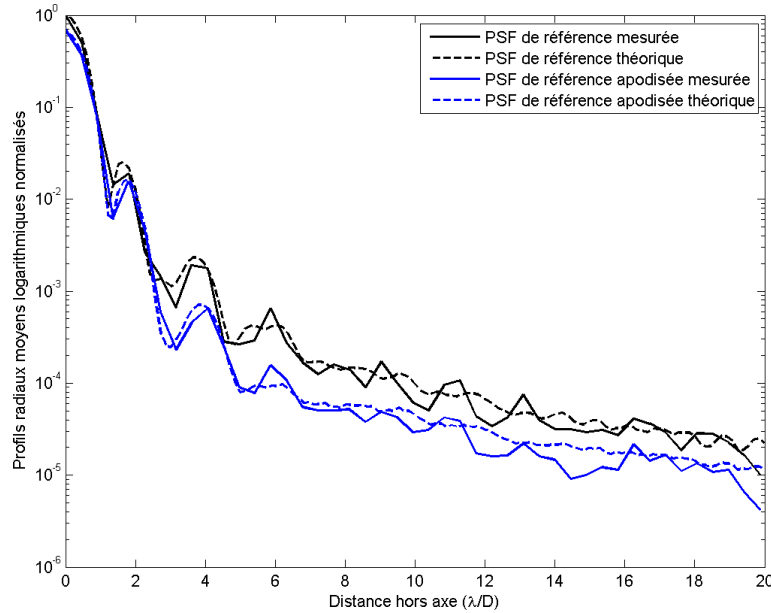


FIG. 6.34 – Profils radiaux moyens des PSF de référence apodisées et non apodisées en bande Y. Traits pleins : mesures. Pointillés : simulations numériques.

Dans ce cas, les PSF mesurées coïncident parfaitement avec les simulations. Ainsi il est nécessaire de trouver le bon compromis puissance de la source/temps de pose permettant d'obtenir des PSF de référence avec la meilleure dynamique possible. Hélas, dans cette configuration, il n'a pas été possible d'enregistrer les PSF coronographiées correspondantes, le temps de pose nécessaire étant supérieur au temps de pose limite d'entrée dans le régime de saturation du détecteur.

- mesures des performances coronographiques avec toutes les pastilles présentes sur le masque coronographique.
- mesures de sensibilité des performances coronographiques à la rotation des masques apodisant, coronographique et Lyot stop.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

7.1 Conclusion concernant les travaux effectués

Dans cette partie, j'ai présenté le travail effectué durant la post-phase A et la moitié de la phase B du projet VLT-SPHERE qui est relatif à l'étude et au développement d'un coronographe de Lyot apodisé. Ce travail a consisté en :

- la caractérisation expérimentale d'un coronographe de Lyot apodisé $3\lambda/D$ dans le visible : détermination du profil en transmission de l'apodiseur et mesures des performances coronographiques en lumière monochromatique,
- la participation aux études numériques relatives au dimensionnement du coronographe de Lyot apodisé de l'instrument SPHERE : dimensionnement des composants du coronographe engendrant les meilleures performances, tolérancement du profil en transmission de l'apodiseur et des positions latérales des composants du coronographe, simulations de l'effet des défauts de phase introduits par l'apodiseur sur l'extinction coronographique,
- la caractérisation expérimentale d'un coronographe de Lyot apodisé $4\lambda/D$ dans le proche-infrarouge : ces premiers tests de caractérisation ont été réalisés sur le banc infrarouge du LESIA à l'observatoire de Paris-Meudon.

Le premier prototype d'ALC visible a démontré que, parmi tous les nouveaux concepts de coronographes qui sont apparus durant les dix dernières années, celui du coronographe de Lyot apodisé est transposable de la théorie à la mise en oeuvre pratique puisque l'on dispose actuellement du savoir-faire technologique nécessaire pour le fabriquer. En effet, ces tests ont permis par exemple de valider le procédé de dépôt de couche mince pour fabriquer l'apodiseur.

Par ailleurs, la mise en oeuvre de différents outils de simulation m'a permis de réaliser une simulation end-to-end d'une chaîne d'imagerie à très haute dynamique. Ceci s'avère être un complément indispensable à toute expérimentation à la fois lors de la préparation de l'expérience pour dimensionner les composants et la mécanique nécessaires que lors du traitement de données pour analyser et interpréter les résultats de mesures obtenus.

Enfin, les premiers tests de l'ALC infrarouge optimisé pour l'instrument SPHERE/VLT respectent, aux biais instrumentaux près, les spécifications pour la coronographie requises par cet instrument afin d'atteindre ses objectifs astrophysiques.

7.2 Perspectives concernant le banc ITHD du LUAN

Deux grandes perspectives sont à considérer : la mise en place de la 2^{ème} version du banc ITHD et l'utilisation du banc ITHD pour la caractérisation d'autres composants coronographiques. Je vais les présenter dans les paragraphes qui suivent.

7.2.1 La 2^{ème} version du banc ITHD, le banc ITHD dynamique

7.2.1.1 Objectifs

Le banc ITHD dynamique constitue l'évolution prochaine du banc ITHD du laboratoire. L'objectif de ce banc est de recréer en laboratoire les déformations de front d'onde dues à la turbulence atmosphérique et non corrigées par le système d'optique adaptative pour en étudier l'influence sur les performances coronographiques. La simulation du résidu de turbulence atmosphérique non corrigé par un système d'optique adaptative sera effectuée par le miroir déformable MIRAOTM 52 fabriqué par le LAOG. Le contrôle de l'aberration optique introduite est effectué par un analyseur de surface d'onde de Shack-Hartmann (HASO).

7.2.1.2 Caractérisation du miroir déformable MIRAOTM 52

Cette étude a été réalisée au printemps 2005 avec Sandrine Auroux, stagiaire de l'IUT du Limousin que j'ai co-encadrée. Le miroir MIRAOTM 52 est un miroir déformable à 52 actionneurs magnétiques, représenté sur la figure 7.1.

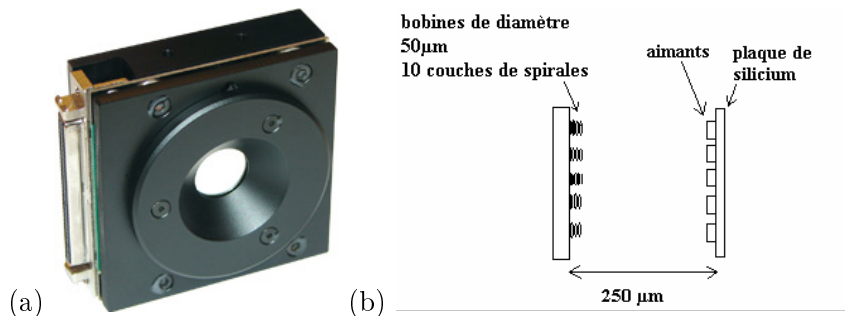


FIG. 7.1 – Le miroir déformable MIRAOTM 52 : (a) photo, (b) schéma de principe.

Son principe de fonctionnement est le suivant : sur la face arrière de la plaque de silicium constituant le miroir sont collés 52 aimants. En face de chaque aimant et à 250 µm en arrière de cette plaque, sont situées des microbobines alimentées par un amplificateur de tension. Lorsque les bobines sont alimentées, elles repoussent ou attirent les aimants, déformant ainsi le miroir. L'amplificateur de tension est piloté par un driver Labview permettant de dialoguer avec l'électronique du miroir.

La table 7.1 donne les spécifications du miroir déformable.

Paramètre	Spécification
Nombre d'actuateurs	52
Capacité maximum de génération de front d'onde	± 1 V maximum
Qualité de surface (remise à plat active)	$0.005 \mu m$
Qualité de front d'onde (remise à plat active)	$0.010 \mu m$
Fréquences spatiales de correction	Zernike jusqu'à l'ordre 6
Diamètre de la pupille	$14.6 mm$
Linéarité	$\geq 95\%$
Hystérésis	$\leq 2\%$
Tension d'entrée des actuateurs	± 1 V max.
Traitement	Argent protégé
Bande spectrale	$250 Hz$ max.
Consommation énergétique	$50 W$ max.
Dimensions/Poids (sans câbles)	$64 \times 64 \times 23 mm$ / $490 g$

TAB. 7.1 – Spécifications du miroir déformable MIRAOTM 52.

Les principales étapes de la caractérisation du miroir déformable sont les suivantes :

- Mise en place du montage de caractérisation : la figure 7.2 présente le schéma de principe du montage optique réalisé pour caractériser le miroir déformable.

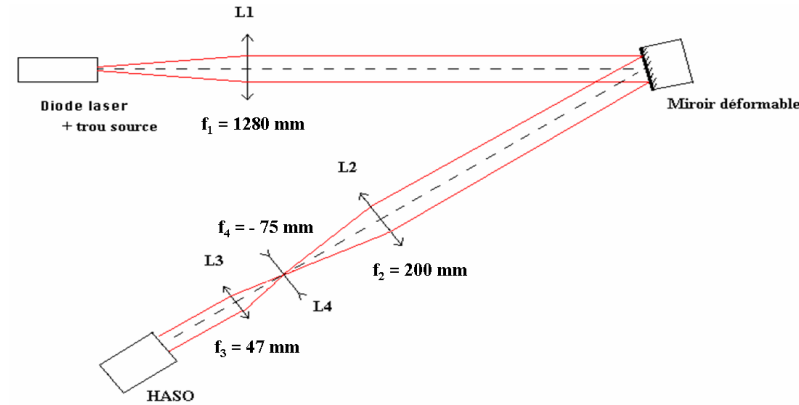


FIG. 7.2 – Schéma de principe du montage optique de caractérisation du miroir déformable.

Un faisceau laser collimaté, issu d'une diode laser de 635 nm, est envoyé sur le miroir déformable. Il est ensuite réfléchi sur le miroir déformable et envoyé vers l'analyseur de surface d'onde qui va l'analyser. L'HASO ne fonctionnant que si le faisceau qu'il reçoit est collimaté ou divergent, les lentilles L2, L3 et L4 permettent d'adapter la géométrie du faisceau de manière à obtenir un faisceau collimaté et de diamètre proche de la dimension de la matrice CCD de l'HASO.

- Calcul des polynômes de Zernike dont les premiers éléments correspondent aux aberrations optiques de bas ordre les plus connues : tilt, focus, astigmatisme, coma, trefoil.
- Projection des polynômes sur le miroir. On a échantillonné les coefficients des polynômes sur une matrice de 52 termes pour correspondre aux 52 actionneurs du miroir et on a envoyé les tensions correspondantes à ces polynômes sur le miroir grâce à une fonction fournie par le LAOG. Les tensions envoyées sont comprises entre -0.5 et +0.5V afin de ne

pas endommager le miroir.

Ainsi, il a été possible de visualiser les polynômes de Zernike générés par le miroir déformable sur l'analyseur de front d'onde : la figure 7.3 présente les résultats obtenus.

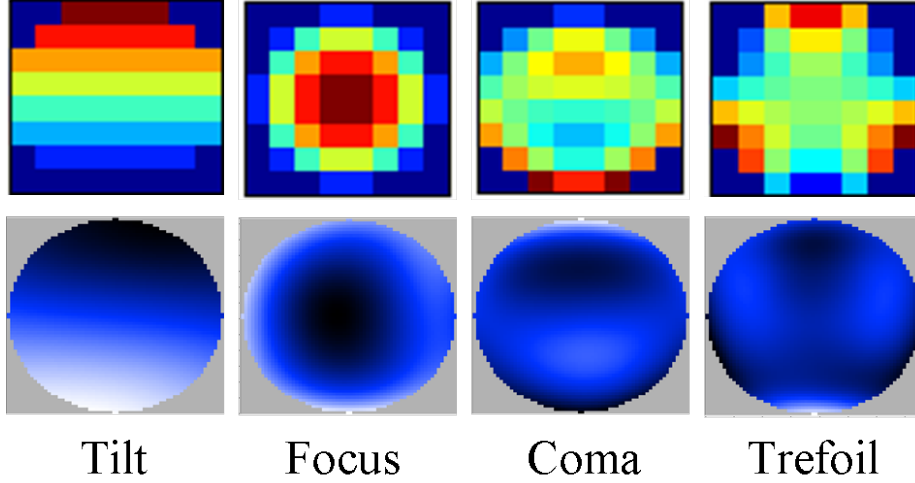


FIG. 7.3 – Premiers résultats de la caractérisation du miroir déformable, génération des premiers polynômes de Zernike : (haut) diagramme des tensions appliquées aux actuateurs du miroir déformable, (bas) front d'ondes résultants obtenus par l'analyseur de surface d'onde.

7.2.1.3 Conception et étude prévisionnelle du banc ITHD dynamique

J'ai participé au design du banc ITHD dynamique avec Richard Douet du LUAN avec l'aide de nos collègues opticiens Yves Bresson et Grégoire Martinot-Lagarde de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Le schéma optique de principe est donné dans la figure 7.4.

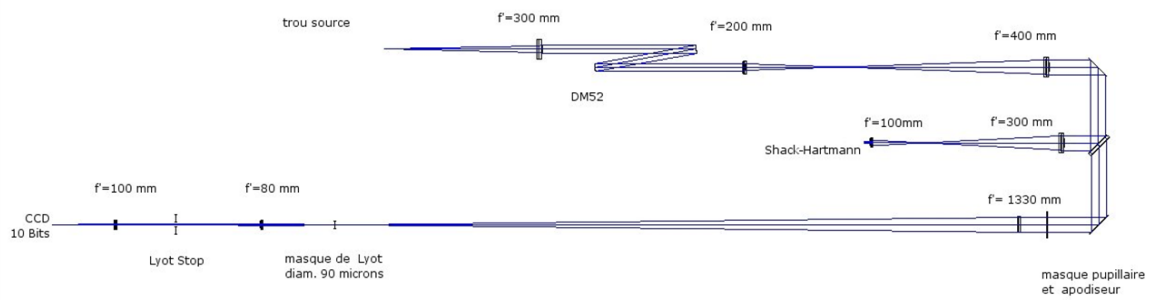


FIG. 7.4 – Schéma de principe du montage optique du banc ITHD dynamique.

Le banc optique est constitué d'un premier objectif, projetant à l'infini l'image d'un trou source. Le faisceau collimaté ainsi formé est réfléchi par le miroir déformable MIRAOTM 52 qui introduit une déformation du front d'onde. Afin de contrôler ce miroir, une partie du faisceau est capté par une lame séparatrice et est renvoyé vers l'analyseur de front d'onde de type Shack-Hartmann,

couplé au miroir déformable par l'intermédiaire d'un PC. Le faisceau rentre ensuite dans la chaîne coronagraphique, rencontrant premièrement le masque pupillaire et l'apodiseur, puis l'objectif, le tout simulant le faisceau de l'UT4 du VLT, ouvert à $f/40$. Au foyer de ce doublet on trouvera le masque coronagraphique de Lyot. En aval du masque se trouve une lentille relai qui collimate le faisceau et crée un plan pupille dans lequel est placé le Lyot stop. L'image finale est formée par un dernier doublet sur la caméra CCD Adimec. Afin d'améliorer la dynamique en intensité des images numérisées, on utilisera par la suite une caméra CCD refroidie.

7.2.2 Autres perspectives du laboratoire autour du banc ITHD

Un partenariat a été démarré par Jean-Baptiste Daban entre le laboratoire (Jean-Baptiste Daban) et l'Observatoire de la Côte d'Azur (Pierre Assus) pour réaliser des apodiseurs par dépôt métallique sur un substrat en rotation derrière un masque. Des premiers essais relativement encourageants ont été effectués au printemps 2007. La figure 7.5 montre un exemple de masque qui a été réalisé lors de ces premiers essais. Des développements du processus de fabrication sont en cours.

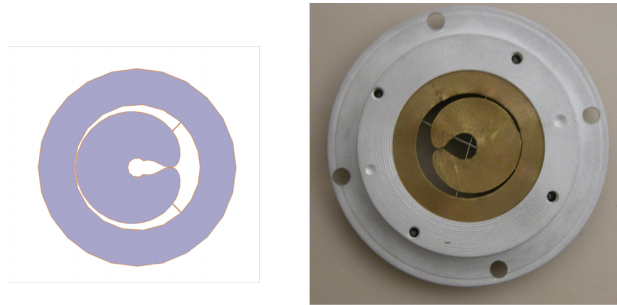


FIG. 7.5 – Exemple de masque réalisé pour fabriquer un apodiseur.

A court terme, les apodiseurs ainsi fabriqués seront testés sur le banc ITHD du laboratoire. Par ailleurs, il est aussi envisagé à plus ou moins long terme d'effectuer des tests d'apodiseurs binaires à points et d'apodiseurs binaires LCD.

7.3 Perspectives concernant le développement de l'ALC infrarouge de SPHERE

La "preliminary design review" de l'instrument SPHERE a eu lieu en septembre 2007. L'ESO a jugé satisfaisant les résultats obtenus et a encouragé la poursuite des tests de développement. Il a été décidé de commander et de tester un nouveau prototype d'apodiseur qui, profitant des améliorations technologiques et des retours d'expériences, est espéré plus conforme aux spécifications que celui que j'ai testé. Deux différences majeures de fabrication concernant ce nouvel apodiseur apparaissent. Tout d'abord, la nature du substrat n'est pas la même, ce sera de la silice fondue afin d'obtenir une meilleure qualité de surface que le CaF_2 . Ensuite, ce même substrat a été commandé à un fournisseur autre que Reynard Corporation afin de pallier les non conformités du substrat que présentait le prototype d'apodiseur $4\lambda/D$ que j'ai testé. Des tests de la qualité de surface de ce substrat ont été effectués au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille avant son envoi à Reynard Corporation pour que le dépôt d'Inconel soit réalisé. L'apodiseur sera livré

au printemps 2008 afin d'obtenir des résultats pour l'Optical Final Design Review (OFDR) de l'instrument SPHERE qui aura lieu fin mai 2008.

Enfin, le design définitif de l'instrument SPHERE et donc le choix des coronographes retenus, aura lieu après la FDR de l'instrument qui est prévue à l'automne 2008.

7.4 Conclusion générale sur l'instrument SPHERE/VLT :

Le projet SPHERE [21], instrument de seconde génération pour équiper l'un des quatre télescopes de 8 mètres du VLT, a vu le jour fin 2002 lors de l'appel d'offre lancé par l'ESO pour une étude complète d'un système permettant la détection et la caractérisation des planètes extrasolaires.

Par la suite, deux consortia différents ont répondu à cet appel d'offre et ont étudié la faisabilité, défini les cibles potentielles et développé un concept préliminaire d'un tel instrument. Après arbitrage par l'ESO entre les deux propositions d'instruments, un design plus précis de l'instrument a été déterminé et la phase B du projet a commencé dès mars 2006. Le concept de l'instrument sera définitivement figé à l'automne 2008 et la première lumière de SPHERE au VLT est prévue pour fin 2010.

Le LUAN participe activement au projet SPHERE en intervenant directement dans les groupes de travail "Coronographes", "Réduction de données", "Science et Simulations". Mon travail se situe dans la participation du laboratoire au développement instrumental et aux simulations numériques.

En outre, parmi les autres domaines d'intervention du LUAN, des études sont menées pour parvenir à la définition d'un algorithme de détection-estimation des positions et intensités des exoplanètes pour une certaine probabilité de fausse alarme (Smith et al., 2007 [96]). En effet, les efforts instrumentaux doivent être suivis d'efforts d'analyse fine des procédures d'observation et des bruits, dont la connaissance statistique sera utilisée pour définir des tests de détection d'exoplanètes.

Enfin, une des applications connexes envisageables de l'instrument SPHERE est l'étude de la morphologie des structures fines de l'environnement d'étoiles massives, de faible luminosité par rapport à l'étoile et dont le scénario d'évolution et le phénomène de perte de masse sont méconnus.

Dans ce contexte, j'ai commencé à étudier, sous forme de simulations numériques réalistes, la possibilité d'imager l'environnement des étoiles massives avec un ensemble optique adaptative-coronographe susceptible d'être installé sur SPHERE.

Troisième partie

CORONA : première expérience de coronographie stellaire à masque de phase au Dôme C en Antarctique

Chapitre 1

Contexte et motivations

1.1 Introduction

CORONA (CORONographe Antarctique) est le premier instrument de coronagraphie stellaire à avoir été envoyé en Antarctique sur le site franco-italien de Concordiastro au Dôme C. Cet instrument est constitué d'un télescope, d'un coronographe à couteaux de phase achromatique (APKC) sans correcteur de tip-tilt travaillant dans le visible, de détecteurs et d'un dispositif de traitement d'images. Il faut préciser qu'il ne disposait d'aucun système de correction adaptative y compris de tip-tilt. CORONA est l'un des tous premiers instruments imageur implanté au Dôme C et constitue un premier prototype précurseur de futurs instruments d'imagerie à très haute dynamique sur ce site quasi-spatial. Je vais présenter l'instrument puis les premiers résultats de son "commissioning", dans un premier temps en laboratoire à Nice puis lors de la campagne d'été 2005 au Dôme C. L'ensemble de cette expérience a été préparée et la mission effectuée elle-même par Jean-Baptiste Daban. Je suis personnellement intervenue pour les tests en laboratoire du coronographe sur le banc ITHD ainsi que pour l'analyse et l'interprétation des résultats d'observation.

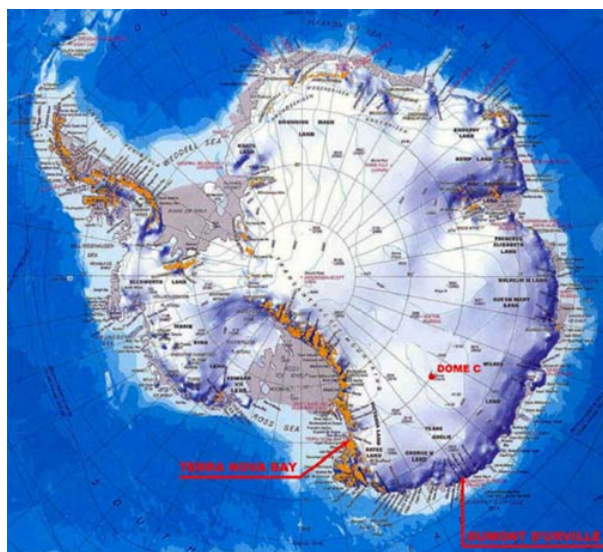


FIG. 1.1 – La station Concordia sur le plateau du Dôme C en Antarctique.

1.2 Rappels sur la station CONCORDIA du Dôme C

La station Concordia a été contruite par les instituts polaires français (l'IPEV) et italien (le PNRA). La station est située sur le site du Dôme C sur le plateau antarctique (75°S , 123°E) à une altitude de 3280 mètres. A ce jour, trois hivernages entiers y ont été effectués depuis 2005. Les premiers résultats de la caractérisation du site présentent Concordia comme étant un site exceptionnel pour les observations astronomiques. Parmi les qualités astronomiques de ce site, on peut citer : la très faible turbulence, les très basses températures ($\bar{T} = -50^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = -80^{\circ}\text{C}$), le ciel coronal très souvent dégagé, les fenêtres infrarouge, le vent faible ($v < 15 \text{ m/s}$, $\bar{v} \approx 3\text{-}4 \text{ m/s}$) ainsi que la possibilité de réaliser des observations en continu sur plusieurs semaines (ou mois) lors de la nuit polaire. Les mesures de seeing effectuées de jour (Aristidi, 2005a [13], b [14]) ont déterminé un seeing moyen de $0.54''$ ainsi qu'un angle isoplanétique de $6.8''$. Ces mesures ont de plus révélé que la constante de structure de l'indice de réfraction (C_n^2) est exceptionnelle et que les profils de vent obtenus sont comparables à ceux des grands sites d'observation astronomiques de Paranal et de Mauna Kea. Cependant, les premières mesures de seeing de nuit effectuées par Karim Agabi (2006 [5]) lors du premier hivernage ont montré que ce seeing pouvait atteindre $0.36''$ uniquement à partir de 30 mètres du sol.

1.3 Principe du coronographe à couteaux de phase (APKC)

Le coronographe à couteaux de phase fait partie de la famille des coronographes dits interférentiels. La coronographie interférentielle utilise les propriétés de cohérence du front d'onde pour produire une interférence la plus destructive possible pour un objet situé sur l'axe de visée et ainsi différencier la lumière d'une étoile de la lumière du compagnon de cette étoile. Ce processus nécessite bien entendu que la lumière provenant de la source principale soit cohérente, ce qui est toujours le cas si les étoiles ne sont pas résolues. La figure 1.2 rappelle le principe du coronographe achromatique à couteaux de phase (Abe, 2001 [1]) similaire au principe du 4QPM.

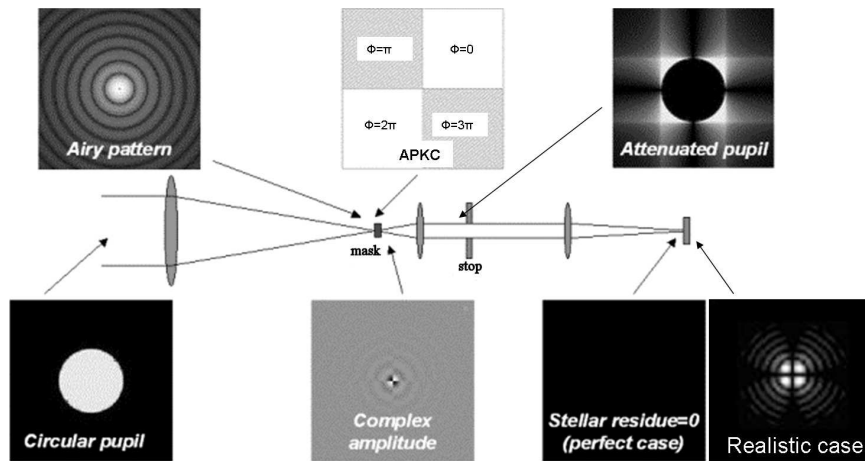


FIG. 1.2 – Principe du coronographe à couteaux de phase.

Le masque coronographique de l'APKC est divisé en 4 quadrants égaux à l'intérieur desquels le déphasage vaut respectivement 0 , π , 2π , 3π . En plaçant le masque coronographique dit à couteaux de phase au foyer du télescope, on divise la répartition spatiale de l'onde dans le plan

image en quatre parties égales : deux quadrants sur une diagonale font subir à la lumière incidente un déphasage de π , les deux autres la laisse passer sans déphasage. Il en résulte que les quatre faisceaux de lumière interfèrent destructivement à l'infini. En plaçant une lentille derrière le masque coronographique pour ré-imager la pupille d'entrée, il apparaît que la lumière résiduelle est rejetée en dehors de la pupille géométrique, avec une contribution plus importante sur les bords. Afin de supprimer ce résidu de lumière, on place un diaphragme ou Lyot stop. Enfin, une lentille placée derrière le Lyot Stop permet d'obtenir l'image coronographiée finale : le résidu stellaire est nul dans le cas idéal c'est-à-dire dans le cas d'une radiation monochromatique, un masque coronographique de taille infinie et parfaitement centré sur l'étoile, sans turbulence ni aberrations.

Cependant, dans des conditions plus réalistes, l'intensité dans l'image coronographiée finale n'est pas tout à fait nulle : la distribution d'intensité résiduelle du halo de la PSF est particulière et est dite à "ailes de papillon". Le niveau d'intensité ainsi que la forme exacte de ce halo dépendent principalement du champ de vue à l'emplacement du masque coronographique (Abe, 2001 [1]). Les performances d'un tel coronographe dépendent beaucoup de la turbulence atmosphérique ; il est donc nécessaire de l'implémenter sur un site bénéficiant de bonnes conditions de seeing si aucun système d'optique adaptative n'est utilisé.

1.4 Motivations

Le site du Dôme C fournit des conditions environnementales uniques pour effectuer des observations astronomiques grâce à la grande stabilité de son atmosphère et de ce fait sa faible turbulence. C'est pourquoi un télescope installé sur ce site et équipé d'un système d'optique adaptative pourrait être très compétitif comparé à d'autres sites plus connus. Les premiers résultats de la caractérisation du site pour l'astronomie encouragent fortement à considérer le Dôme C comme un site potentiel pour la construction d'un nouveau grand observatoire principalement dédié à des observations en imagerie à très haute dynamique. Dans ce contexte, et avant l'installation d'instruments à plus grande échelle, CORONA a été proposée comme une expérience de démonstration menée en parallèle avec la caractérisation poussée du site. L'instrument CORONA que je vais présenter constitue un instrument précurseur d'un point de vue technique si l'on considère le masque coronographique, le système d'acquisition et surtout l'opération dans des conditions extrêmes. Cette expérience va permettre d'avoir une meilleure appréhension d'un instrument plus complet avant son installation sur un télescope plus grand dans le futur.

Chapitre 2

L'instrument CORONA

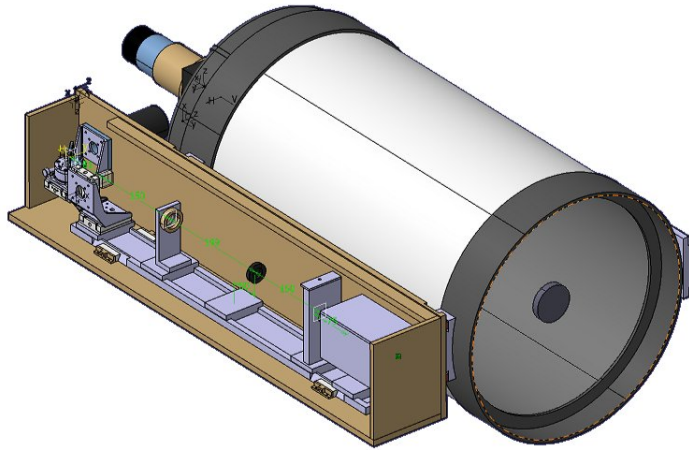


FIG. 2.1 – Vue 3D sous CATIA de l'instrument CORONA.

CORONA est destiné à travailler dans le visible. Le télescope est un modèle CELESTRON 14 de 14" utilisant une combinaison optique Schmidt-Cassegrain. Une monture, fixée sur le côté du télescope, porte l'ensemble de la chaîne d'imagerie coronagraphique, à savoir le masque coronagraphique ainsi que toutes les optiques en aval de celui-ci et les détecteurs CCD. Le détecteur de science utilisé est une caméra CCD qui est destiné à enregistrer l'image coronagraphiée finale.

Afin d'accroître les performances (notamment en raison de l'absence de système d'optique adaptative), une méthode d'analyse dite de sélection d'images est utilisée (Abe et al., 2007 [4]). Pour ce faire, une autre caméra CCD (dite de contrôle) est présente dans le champ focal du télescope en amont du coronographe et visualise en temps réel la position du faisceau lumineux. Si le faisceau est décentré (à cause du tip-tilt au premier ordre des perturbations atmosphériques), la caméra de contrôle détectera ce problème et commandera à la caméra d'acquisition de ne pas enregistrer ces données perturbées, en fin de chaîne. On peut ainsi générer des poses longues à fort contraste obtenues à partir de plusieurs pauses courtes sélectionnées parmi toutes les images. Cette technique, même dans le cas particulier ici coronagraphique, est similaire à la méthode dite de "Lucky Imaging" utilisée sur des grands télescopes (Law et al., 2006 [67]).

2.1 Le masque de phase achromatique à couteaux de phase

Le concept du masque coronagraphique de l'APKC a été réalisé par Jean Gay et Farrokh Vakili de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Le masque a été fabriqué par Gérard Greiss de la société Sud-Est Optique de Précision (SEOP, Lorgues, France). Le déphasage du masque est réalisé par la combinaison de lames de verres en BAF52 et BAF4 de $99\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, accolées deux à deux, croisées et superposées. C'est cet empilement de couches réfractives d'indices différents et de même épaisseur (méthode dite "des Hollandais") qui produit le déphasage de π voulu et le rend achromatique.

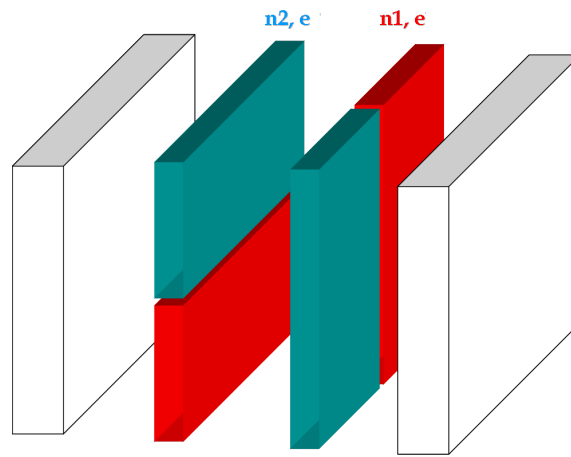


FIG. 2.2 – Assemblage optique du masque coronagraphique de l'APKC : deux couteaux de phase de $99\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur sont accolés entre deux épaisses lames de verre de 6 mm .

Le masque coronagraphique a tout d'abord été exposé aux températures extrêmes du Dôme C en Novembre 2004.



FIG. 2.3 – Masque coronagraphique exposé aux conditions extrêmes du Dôme C en Novembre 2004.

A son retour à Nice, le composant ne semblait avoir subi aucune altération visible. Des tests de validation ont été réalisés et sont présentés dans le chapitre suivant.

2.2 Le banc coronagraphique

La figure 2.4 montre le banc coronographique qui est monté sur le coté du télescope pendant son réglage de laboratoire avant envoi au Dôme C. Le design de ce banc a été réalisé par Jean-Baptiste Daban sur la base du premier démonstrateur de l'APKC effectué par Lyu Abe (Abe et al., 2007 [4]).

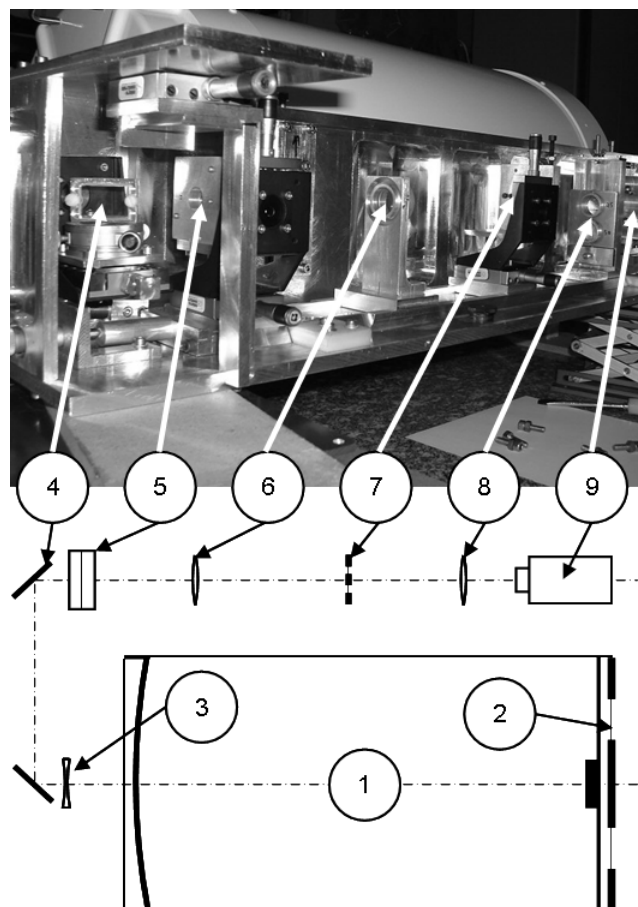


FIG. 2.4 – Principe de l'instrument CORONA (pour la description des éléments voir la table 2.1).

Numéro	Elément	Caractéristiques
1	Télescope C14	F=3910 mm, D=355mm
2	Masque d'ouverture	voir Fig 2.5
3	Lentille de Barlow	$f=-75\text{mm}$
4	Lame séparatrice	R=80%, T=20%
5	Masque coronagraphique	voir section 2.1
6	Lentille relais L_1	$f_1=+150\text{mm}$
7	Lyt stop	Diaphragme à 4 trous, voir section 2.3
8	Lentilles d'imagerie L_2 et L_3	$f_2=+75\text{mm}$, $f_3=+50\text{mm}$
9	Caméra de Science	PCO Pixelfly

TAB. 2.1 – Descriptif des composants de l'instrument CORONA.

Les caractéristiques des éléments du banc coronographique sont décrits dans la table 2.1. Le faisceau traverse une séparatrice qui transmet 80% de la lumière vers la caméra de monitoring, une caméra CCD Watec. Les 20% de lumière restante sont réfléchis vers la caméra de science à travers le coronographe. Vient ensuite le masque coronographique placé au foyer du télescope. Derrière le masque, la lentille de relais L_1 ré-image la pupille d'entrée. Le Lyot stop est positionné dans ce plan pupille relais. Ensuite, deux lentilles d'imagerie L_2 et L_3 , montées sur le même support peuvent être interchangeables afin d'imager respectivement l'image focale ou l'image pupillaire sur la caméra. En effet, il est nécessaire de pouvoir imager la pupille coronographiée sur le détecteur lors de la procédure d'alignement préalable du banc.

Nombre de pixels	640×480
Taille du pixel	$9.9 \times 9.9 \mu\text{m}$
Dynamique	12 bits
Temps d'exposition	$10 \mu\text{s}$ à 10 s
Taux de rafraichissement	40 fps sans binning
Efficacité quantique maximum	40% at 500 nm
Bande passante (FWHM)	360 – 640 nm
Gain en ADU	$7 e^-/\text{compte}$
Bruit de lecture	$16 e^-$

TAB. 2.2 – Spécifications techniques de la caméra CCD de science PCO Pixelfly.

La caméra de science est une caméra CCD PCO Pixelfly. Elle est interfacée à un PC d'acquisition et de traitement temps-réel par une liaison rapide du type Ethernet. Ses spécifications techniques sont données dans la Table. 2.2. Les caméras sont placées dans des boîtes isolées et contrôlées thermiquement : ainsi, la température à l'intérieur de la boîte est de l'ordre de -15°C et grimpe jusqu'à 0°C sur la matrice CCD grâce à la dissipation thermique.

2.3 Le télescope

Le télescope de CORONA est un modèle CELESTRON 14 du commerce qui a été par la suite adapté pour l'Antarctique (cf section 2.4.1) Il s'agit d'un télescope Schmidt-Cassegrain de 14" à obstruction centrale : les diamètres des miroirs primaires et secondaires étant respectivement 355 mm et 112mm ; il en résulte un taux d'obstruction de 0,315. Le télescope est équipé d'une lentille de Barlow ; la longueur focale équivalente du télescope vaut ainsi 24 406mm. Le télescope est monté sur une monture équatoriale Astrophysics 1200 et posé sur un pied en bois massif fixé sur la glace polaire (Aristidi, 2005b [14]).

Par ailleurs, il est bien connu que l'obstruction centrale du télescope altère de manière significative les performances coronographiques (Riaud et al., 2001 [87]). Pour remédier à ce phénomène, Lloyd et al. (2003 [69]) ont proposé plusieurs géométries de pupille d'entrée améliorant les performances coronographiques en présence d'un télescope à obstruction centrale. Cependant, cette amélioration de l'efficacité du coronographe s'effectue aux dépens d'une perte de transmission. La nouvelle pupille d'entrée se compose de 4 trous entourant l'obstruction centrale (voir figure 2.5) La transmission globale de la pupille est ainsi réduite de 42.7% par rapport à la pleine ouverture. Cette modification de la forme de la pupille d'entrée entraîne par conséquent un changement de la forme du Lyot stop. Cette dernière réplique la géométrie de la pupille d'entrée via :

- une homothétie effectuée par un grandissement produit par les optiques en amont,
- une réduction de 30% du diamètre des trous.

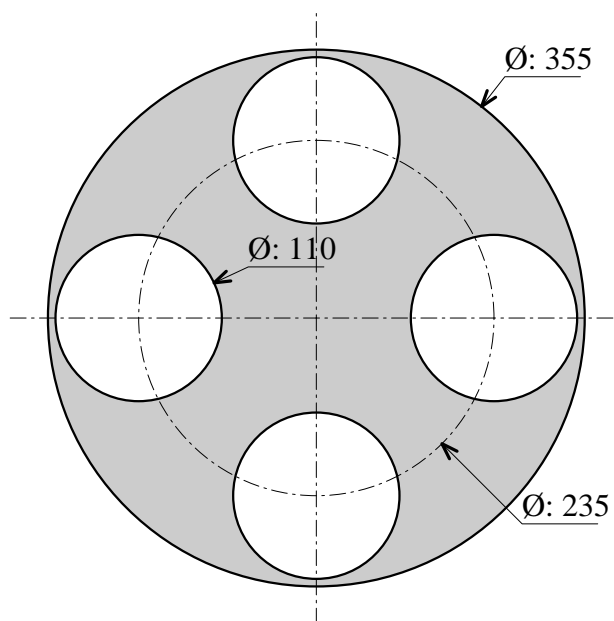


FIG. 2.5 – Géométrie de la pupille d'entrée de CORONA : 4 trous entourent l'obstruction centrale ; les dimensions sont en mm.

Par ailleurs, on peut remarquer que la même modification de la pupille d'entrée pour un masque coronographique à 4 quadrants a été récemment proposée par Serabyn et al. (2006 [92]) en utilisant une sous-pupille ronde hors-axe du télescope combinée à un système d'optique adaptative performant.

2.4 Antarctisation de l'instrument

2.4.1 Le télescope

L'antarctisation du Célestron 14 de CORONA a été réalisée par Frank Valbousquet de la société Optique et Vision (Juan-les-Pins, France). La structure mécanique du télescope a été modifiée pour supporter les conditions antarctiques de froid extrême. Tout d'abord, le tube du télescope a été remplacé : le tube original fait en alliage d'aluminium est remplacé par un tube en InvarTM. En effet, l'invar possède un coefficient d'expansion thermique environ 10 fois plus faible que ceux des alliages d'aluminium ($\approx 10^{-6}$ contre $\approx 12 \times 10^{-6}$). Ensuite, toutes les parties mécaniques sont nettoyées à sec puis graissées avec une graisse restant visqueuse jusqu'à -80°C .

La procédure de collage des miroirs du télescope est une opération délicate qui se déroule en plusieurs étapes. La colle utilisée est une colle silicone de la marque General Electric. Cette colle est en deux composants ; il faut mélanger dans la proportion de 1/10 et 9/10 puis dégazer le mélange en le maintenant sous pression. La colle obtenue est très liquide, comme du sirop. Il faut ensuite réaliser des moules dans lesquels on coule la pièce à coller et le verre, directement sur le miroir pour le secondaire ou au dos du miroir pour le primaire (voir figure 2.6). Le séchage nécessite une période d'évaporation à température ambiante longue de deux semaines environ. Si le miroir est assez petit, il est mis au four chaud à 80°C pendant trois jours.

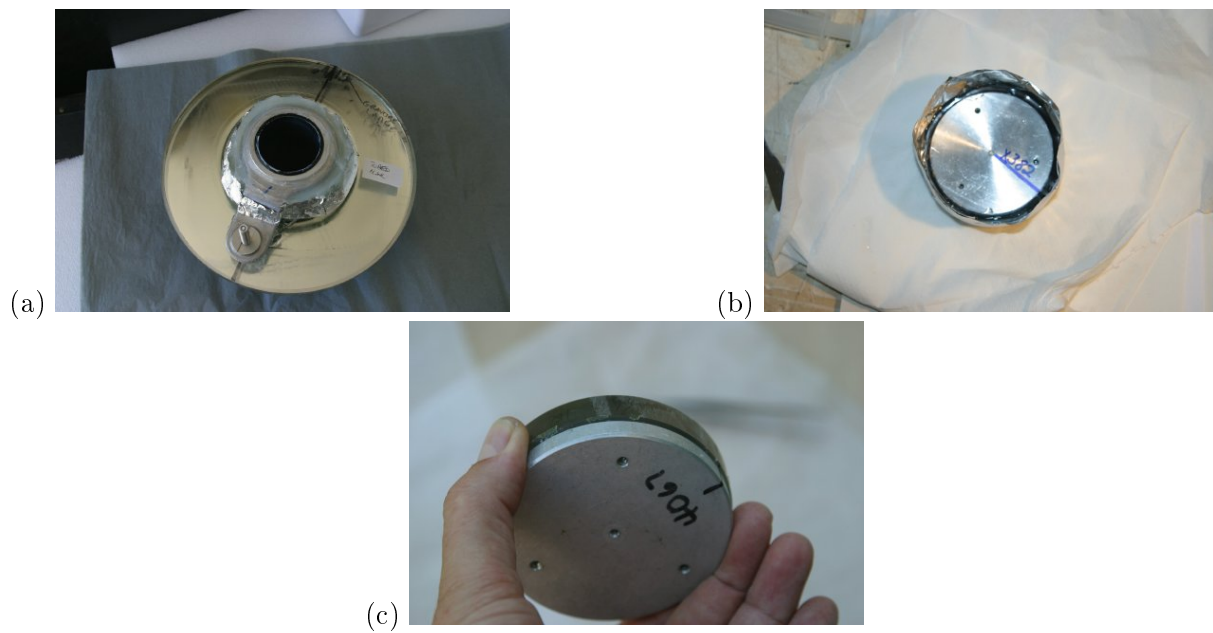


FIG. 2.6 – Collage des miroirs sur leurs supports : moules fabriqués pour le collage (a) du miroir primaire et (b) du miroir secondaire ; (c) miroir secondaire collé sur son support.

Ensuite, on dépose un scotch antarctic pour protéger la tranche ainsi qu'une couche de joint à parebrise sur le primaire.

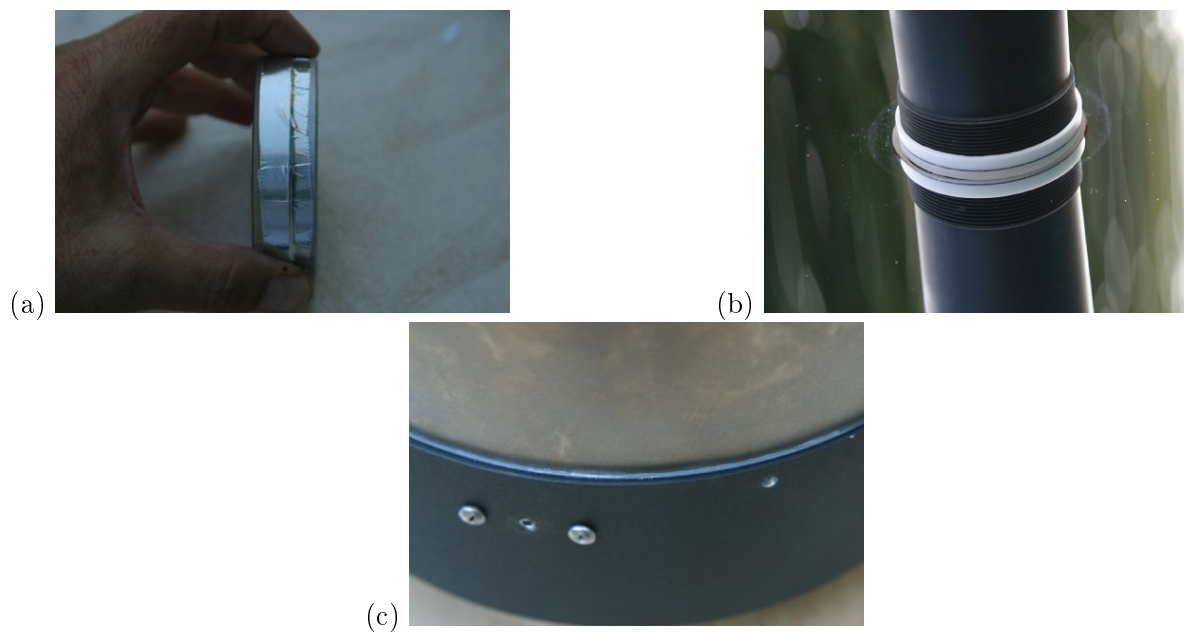


FIG. 2.7 – Antarctisation du télescope de CORONA : (a) dépôt d'un scotch sur la tranche des miroirs, (b) pièce antiflopping, (c) modification du support du miroir secondaire.

Puis un processus développé spécifiquement par Optique et Vision est mis en oeuvre (voir figure 2.7). Entre le primaire et son support, il faut réaliser une pièce "antiflopping" qui le positionne de manière centrée sans l'aide de la colle d'origine qui est enlevée. Cette pièce est tronc conique et est réalisée sur mesure pour chaque miroir de manière à ne rien contraindre ; le matériau est en Poly Tétr Fluoro Ethylène (PTFE). Les supports secondaires sont aussi modifiés de façon à supprimer les pièces plastiques par des pièces en aluminium 7075 usiné. De même, des joints de rétraction en PTFE sont ajustés entre les tôles INVAR et les pièces en aluminium moulé.

2.4.2 Le masque coronagraphique

L'antarctisation du masque coronagraphique est un processus développé spécifiquement par Gérard Greiss de la société Sud-Est Optique de Précision à notre demande. Ce type complexe d'optique nécessite de multiples assemblages allant de l'adhérence moléculaire au collage puisque les verres sont d'indices et de densités différents. Le processus de fabrication est schématisé dans la figure 2.8.

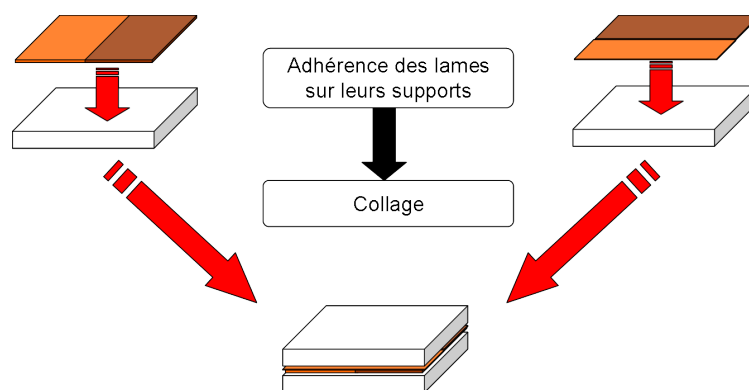


FIG. 2.8 – Processus de fabrication du masque coronagraphique de l'APKC : adhérence des paires de lames sur leurs support respectifs puis collage.

Comme les lames des couteaux de phase ont une épaisseur inférieure à $100\mu\text{m}$, des protections externes sont nécessaires afin d'éviter la pénétration d'humidité.

Tout d'abord, chaque paire de lames est adhérente sur son support ; la difficulté de ce processus est la liaison des lames de matières différentes sur leur support respectif, ceci requiert une planéité et une propreté parfaites ainsi qu'une grande étanchéité de l'optique.

Puis le collage des deux éléments est effectué. C'est la différence de densité des lames qui rend obligatoire le recours au collage. Le choix de la colle est très important ; les critères essentiels de choix sont : l'indice de réfraction qui doit être le plus proche de celui des composants, le coefficient de dilatation et la température d'utilisation. La colle qui a été utilisée est la colle militaire NOA68TM qui a été conseillée par F. Jeanneaux du LUAN.

Ensuite, le masque coronagraphique est enrobé d'une colle souple résistant à -70°C pour bloquer la pénétration de l'humidité.

Le composant est enfin opérationnel après quelques semaines de séchage. Les essais pendant la campagne d'été de 2004 ont permis de tester la stabilité de l'APKC et assurer l'opération de CORONA à base de ce composant en 2005.

Chapitre 3

Tests en laboratoire de l'APKC

Après l'exposition du masque coronagraphique aux conditions extrêmes du Dôme C en Novembre 2004, des tests de validation du composant ont été effectués en laboratoire sur le banc d'imagerie à très haute dynamique du laboratoire par Jean-Baptiste et moi-même. Ces mesures ont été affinées au cours du printemps 2005 avec Julien Sarry, stagiaire de l'IUT du Limousin que j'ai co-encadré. Les objectifs de ces tests étaient les suivants :

- valider le déphasage produit par le masque coronagraphique,
- valider le processus d'achromatisation,
- valider la résistance thermique du composant aux conditions de température extrêmes du Dôme C.

Le banc d'ITHD du LUAN a déjà été présenté en détail au chapitre 4 de la partie II. Quelques lentilles ont été remplacées afin de pouvoir adapter l'APKC sur le banc. Pour chaque différent type de mesures effectuées, je ne rappellerai ici que le schéma optique ayant permis de les réaliser.

3.1 Tests effectués avec une pupille d'entrée ronde

Validation du déphasage produit par le masque coronagraphique

La première mesure effectuée a pour but de valider le déphasage produit par le masque APKC et de vérifier la bonne transition entre les lames de phase. Pour ce faire, on place la caméra CCD dans le plan pupille coronagraphique et l'on effectue des acquisitions pour différentes valeurs d'ouverture de la pupille d'entrée.

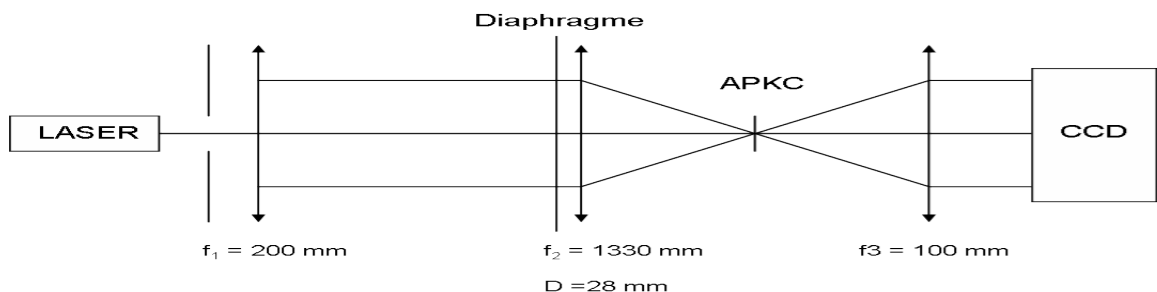


FIG. 3.1 – Schéma de principe de la mesure de validation du déphasage du masque APKC effectuée sur le banc ITHD du LUAN.

De cette manière, le masque coronagraphique est centré sur des taches d'Airy de dimension différentes et l'on peut ainsi apprécier la bonne qualité de transition entre les couteaux de phase. Afin de valider le déphasage introduit par les deux couteaux de phase, il faut centrer le faisceau optique indépendamment sur chaque couteau : pour ce faire, on centre le faisceau sur l'un des couteaux puis sur les deux. Les différents diaphragmes qui ont été successivement introduits ont pour diamètre :

- $\Phi=5\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 266,
- $\Phi=6.5\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 205,
- $\Phi=8.5\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 156,
- $\Phi=11.3\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 118,
- $\Phi=12.5\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 106,
- $\Phi=14.2\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 94,
- $\Phi=19.4\text{mm}$ ce qui correspond à un rapport d'ouverture de 69.

Les diaphragmes utilisés correspondent aux composants dont nous disposons. La figure 3.3 montre les différentes images obtenues que l'on peut comparer aux simulations numériques. L'allure des images expérimentales corrobore parfaitement les simulations numériques et ce, quelle que soit la valeur du rapport d'ouverture. Ce premier test de caractérisation est donc validé.

Mesure des performances coronagraphiques de l'APKC

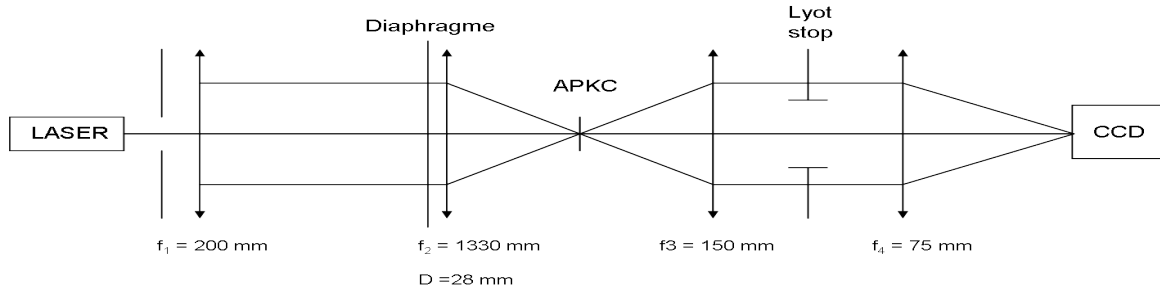


FIG. 3.2 – Schéma de principe de la mesure des performances coronagraphiques de l'APKC effectuée sur le banc ITHD du LUAN.

Ensuite, afin de caractériser quantitativement l'effet du masque coronagraphique, nous avons mesuré les performances coronagraphiques de l'APKC. Le schéma de principe de la mesure est donné sur la figure 3.2. Le diaphragme d'entrée est une pupille ronde de diamètre $\Phi=19.4\text{mm}$ ce qui correspond à rapport d'ouverture de 69 de télescope de CORONA. Le Lyot stop est placé dans le plan pupille coronagraphique conjugué, il s'agit d'un diaphragme de diamètre correspondant à 70% de la taille de l'image géométrique de la pupille. On acquiert une série d'images de référence et coronographiées et leurs séries de darks correspondants. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- temps d'intégration des images de référence : $10.94\text{ ms} + \text{densité atténuant de } 10^3$,
- temps d'intégration des images coronographiées : 10.94 ms ,
- nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 1000.

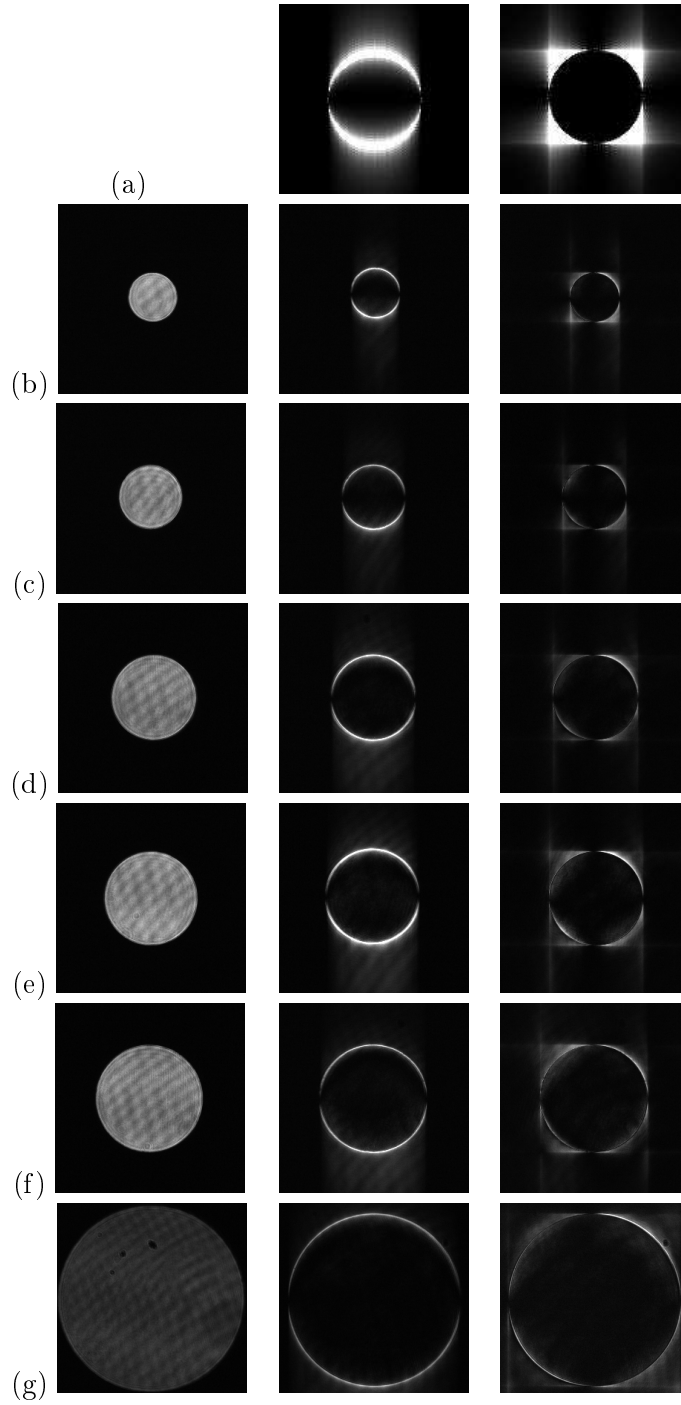


FIG. 3.3 – Images en plan pupille : (a) simulations numériques lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (gauche) puis à l'intersection des deux couteaux de phase. Mesures pour un rapport d'ouverture de (b) 205, (c) 156, (d) 118, (e) 106, (f) 94 et (g) 69 : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).

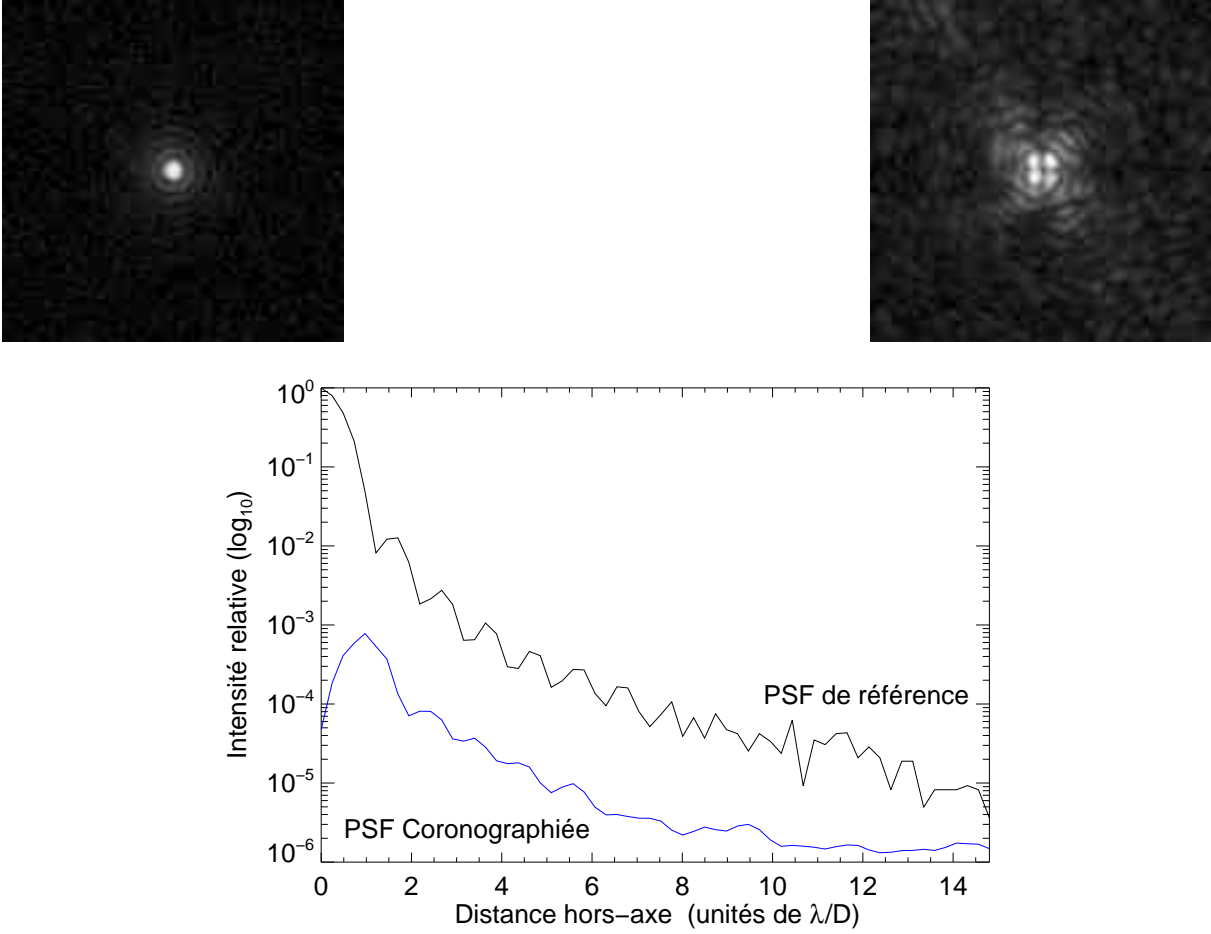


FIG. 3.4 – Images de référence et coronographiée et profils radiaux moyens correspondants.

La figure 3.4 montre les poses longues obtenues ainsi que les profils radiaux moyens correspondants. Plusieurs séries de mesures ont été réalisées et les performances coronographiques suivantes ont été obtenues :

- extinction : 900 ± 200 ,
- réjection : 500 ± 200 .

Ces performances dépendent beaucoup des réglages préliminaires ce qui explique les valeurs importantes des barres d'erreurs. En effet, il faut que le banc de mesure soit très bien aligné, avec des réglages optimisés des optiques afin de ne pas introduire de réflexions parasites ou de tilt. Il faut de plus optimiser la valeur du flux reçu par la caméra afin d'effectuer un compromis entre les différents bruits de mesure de manière à, par exemple, s'affranchir du bruit de la caméra ou à ne pas amplifier le bruit ambiant. Néanmoins, la qualité du masque coronographique est validée et ceci autorise la continuation de sa qualification.

3.2 Tests effectués avec une pupille à obstruction centrale

Les mesures effectuées dans la section précédente sont réalisées cette fois-ci avec une pupille d'entrée présentant une obstruction centrale afin de reproduire la forme de la pupille d'entrée du télescope de CORONA.

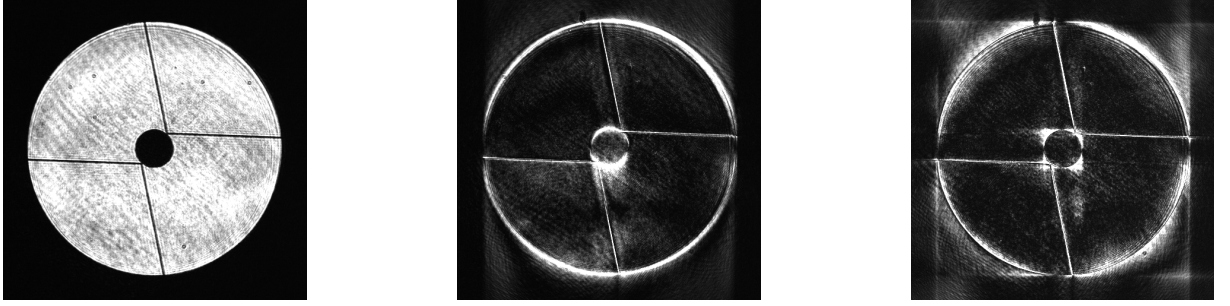


FIG. 3.5 – Images en plan pupille : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).

La présence d'une obstruction centrale est extrêmement néfaste pour l'APKC ; sa présence entraîne une ré-injection de l'énergie lumineuse dans la pupille coronagraphique et ce proportionnellement au rapport de la surface de la pupille à celle de l'obstruction (Riaud, 2001 [87]). De plus, l'intensité lumineuse maximale au centre de la pupille est la même que celle à l'extérieur du support de la pupille. Comme vu précédemment au chapitre 4, le banc ITHD dispose d'un masque pupillaire reproduisant la pupille du VLT. Bien que les taux d'obstruction de la pupille du VLT et du C14 de CORONA soient différents (0.15 contre 0.315), cette mesure est effectuée afin de vérifier la cohérence des résultats avec les simulations numériques. On réitère la mesure qualitative en plan pupille, les résultats sont présentés sur la figure 3.5.

On effectue ensuite la mesure des performances coronagraphiques de l'APKC en présence d'une pupille d'entrée à obstruction centrale.

Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- Temps d'intégration des images de référence : 10.94 ms + densité atténuant de 10^3 ,
- Temps d'intégration des images coronographiées : 10.94 ms,
- Nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 1000.

On peut voir nettement sur ces images l'effet de l'obstruction centrale qui ré-introduit de la lumière dans l'image coronographiée.

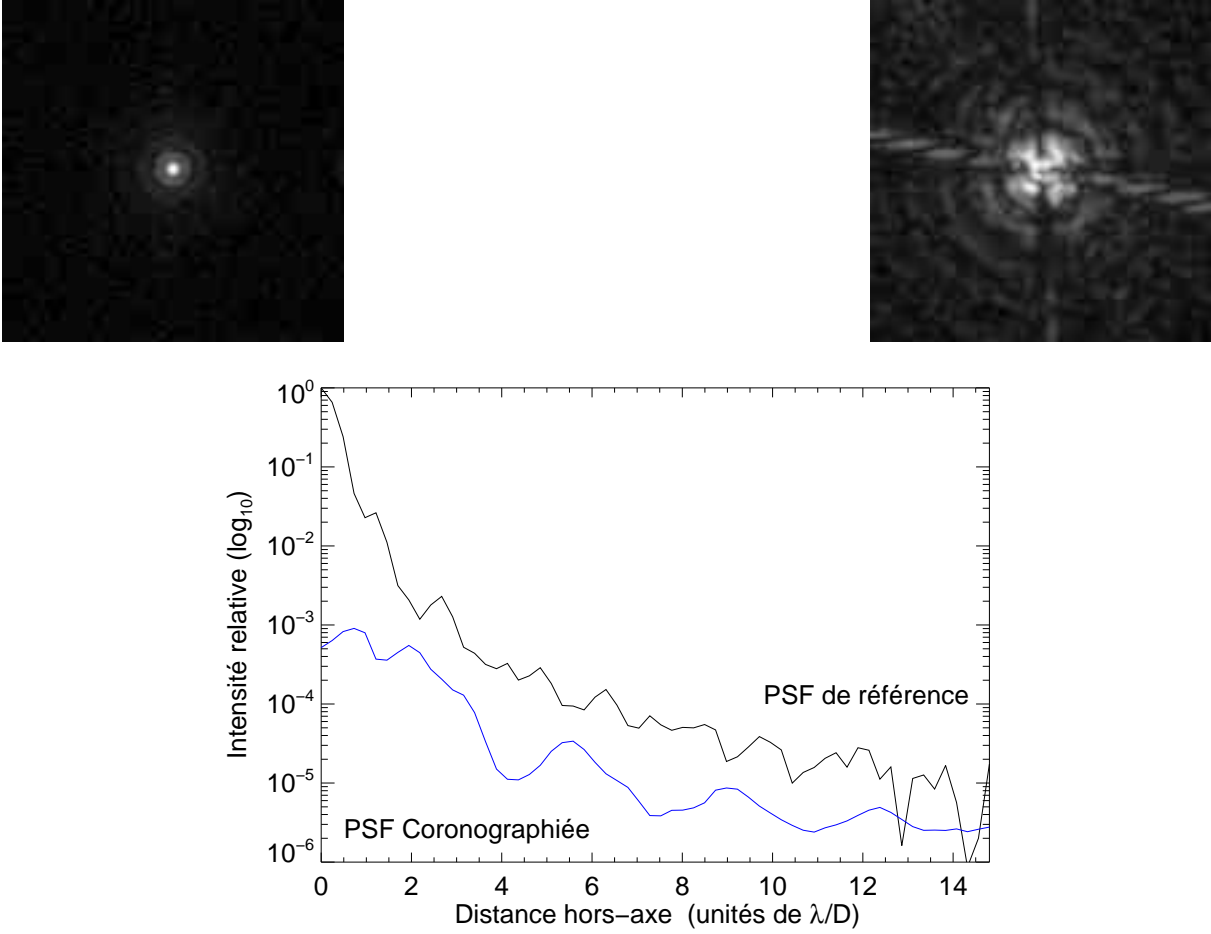


FIG. 3.6 – Images de référence et coronographiée et profils radiaux moyens correspondants.

Plusieurs séries de mesures ont été réalisées et les performances coronagraphiques suivantes ont été obtenues :

- extinction : 400 ± 50 ,
- réjection : 450 ± 50 .

Ces résultats vérifient expérimentalement un des défauts de l'APKC à savoir sa grande sensibilité aux pupilles de télescope à obstructions centrales et permettent de quantifier une perte de performance d'environ 40%. Il convient aussi de rappeler que cette mesure a été effectuée avec le même diaphragme de Lyot circulaire que pour la mesure avec une pupille d'entrée circulaire soulignant ainsi la nécessité d'optimiser la forme et la taille du diaphragme de Lyot.

3.3 Tests effectués avec une pupille d'entrée à 4 trous

Il faut tenter de contourner les contraintes technologiques introduites par l'obstruction centrale. Pour ce faire on modifie la géométrie de la pupille d'entrée comme exposé dans la section 2.3, ce qui consiste à créer une pupille d'entrée composée de quatre trous tangents à la fois à l'obstruction mais aussi au diamètre extérieur de la pupille. Le diaphragme de Lyot possède également la même structure.

Comme précédemment, la figure 3.7 montre les acquisitions de pupille faites avec la pupille d'entrée à 4 trous de l'instrument CORONA.

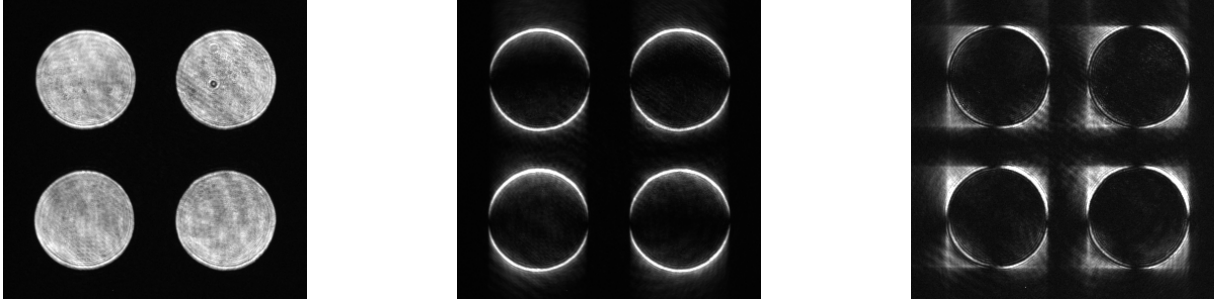


FIG. 3.7 – Images en plan pupille : (gauche) pupille d'entrée, mesures lorsque le faisceau est centré sur un couteau de phase (centre) puis à l'intersection des deux couteaux de phase (droite).

De plus, compte tenu de la géométrie de la pupille d'entrée, la PSF n'est plus une figure d'Airy mais une figure combinant à la fois les effets de la diffraction dus à l'ouverture finie et le phénomène d'interférence introduit par les quatre trous. La figure 3.8 montre la simulation des PSF attendues.



FIG. 3.8 – Simulation numérique des PSF de l'instrument CORONA attendues avec une pupille d'entrée à 4 trous : (a) PSF de référence, (b) PSF coronographiée.

Les résultats des mesures des performances coronographiques sont données sur la figure 3.9. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- Temps d'intégration des images de référence : 10.94 ms + densité atténuant de 10^3 ,
- Temps d'intégration des images coronographiées : 10.94 ms,
- Nombre de poses courtes sommées pour obtenir la pose longue : 1000.

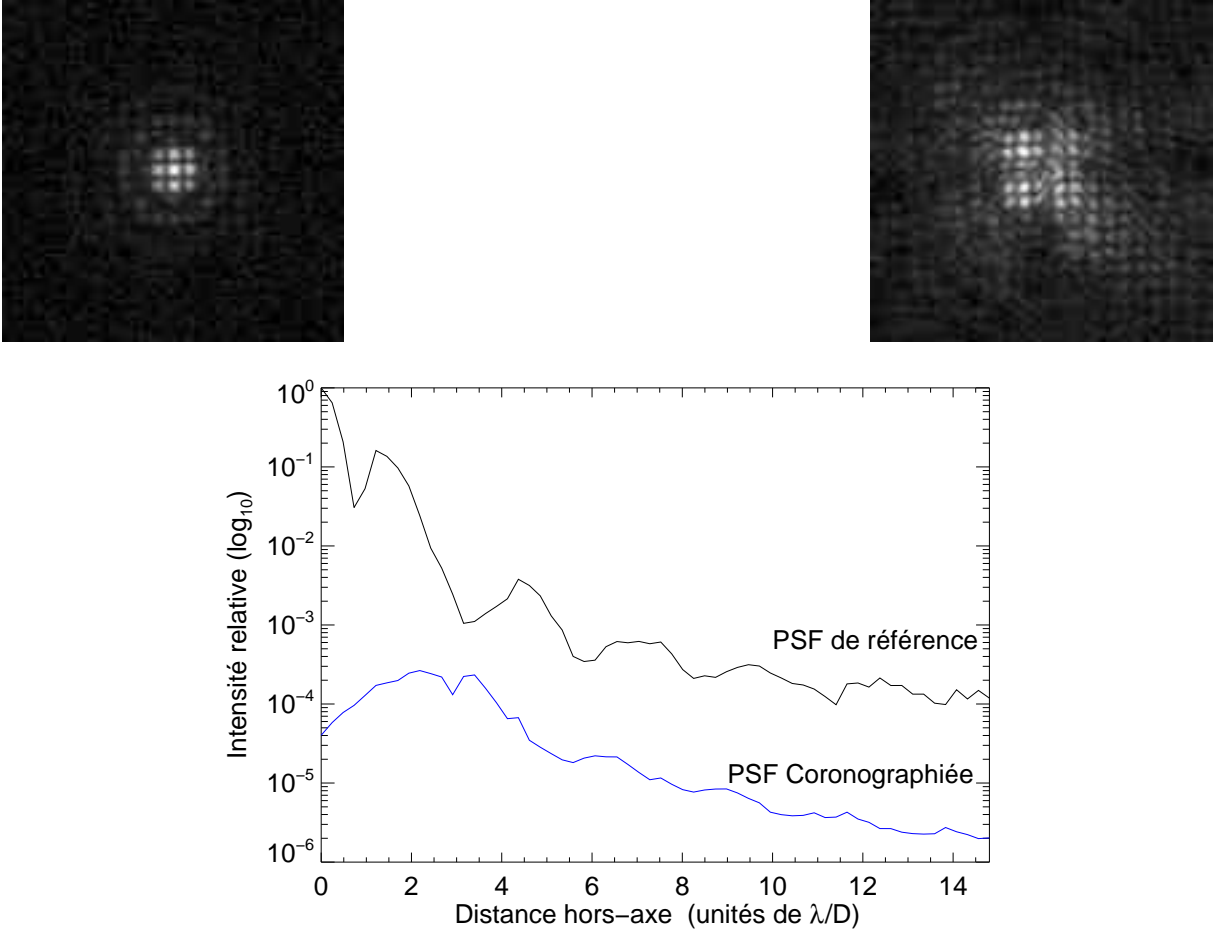


FIG. 3.9 – Images de référence et coronographiée et profil radiaux moyens correspondants.

L'allure des PSF correspond aux simulations numériques aux erreurs expérimentales près.

Les performances coronagraphiques suivantes ont été obtenues :

- extinction : 600 ± 50 ,
- réjection : 100 ± 10 .

Ce premier test est encourageant car le diaphragme de Lyot utilisé n'était pas le diaphragme optimal. En effet, le diamètre de chaque trou lors de cet essai correspondait à 85% du diamètre de l'image des sous-pupilles (contre 70% pour l'optimum) et dépendait de la taille des forets disponibles pour le fabriquer.

3.4 Conclusion

J'ai présenté dans ce chapitre les tests de validation du masque coronographique qui ont été effectués en laboratoire sur le banc d'imagerie à très haute dynamique du LUAN. J'ai donc testé ce masque dans plusieurs conditions d'utilisation, me rapprochant à chaque fois des conditions réelles dès que l'étape précédente était validée. La première étape des tests a consisté à vérifier la transition entre les couteaux de phase pour savoir si le froid avait altéré le pouvoir déphasant des couteaux. Cette étape étant validée, je suis passée à la quantification des performances coronographiques dans plusieurs configurations de pupilles d'entrée et de Lyot stop en lumière monochromatique. Les résultats obtenus sont très encourageants :

- dans le cas d'une pupille d'entrée circulaire et pleine : extinction moyenne de 900 ± 200 .
- dans le cas d'une pupille d'entrée circulaire avec obstruction centrale et des araignées : extinction moyenne de 400 ± 50 .
- dans le cas d'une pupille d'entrée avec quatre trous (même géométrie pour le Lyot stop) : extinction moyenne de 600 ± 50 .

Il convient de noter que d'autres mesures auraient pu être effectuées, notamment en lumière blanche. Cependant, les délais avant l'envoi de l'instrument au Dôme C étaient serrés et les résultats obtenus étaient suffisants pour passer à l'étape d'intégration de l'instrument CORONA. Après ces tests du masque coronographique sur le banc ITHD, l'instrument a été monté et testé en laboratoire puis il a été testé 2 nuits sur le ciel à l'observatoire de Nice avant son envoi en octobre 2005 à Concordia.

Chapitre 4

Premiers tests sur le ciel du coronographe stellaire CORONA au Dôme C

L'instrument CORONA, coronographe à couteaux de phase achromatique (APKC) visible, installé au foyer d'un Célestron 14 sans système d'optique adaptative y compris de tip-tilt, a été envoyé fin octobre 2005 au Dôme C. Ce chapitre présente les premiers résultats de tests sur le ciel de l'instrument au Dôme C, lors de la campagne d'été 2005. Les observations ont été réalisées par mes collègues du LUAN Jean-Baptiste Daban et Eric Aristidi. La première lumière de CORONA a été obtenue le lundi 5 décembre à 11 h, heure locale.



FIG. 4.1 – 5 décembre 2005, 11h heure locale : première lumière de CORONA au Dôme C.

4.1 La campagne de décembre 2005

4.1.1 Conditions d'observations et contraintes

Préalablement aux observations sur le ciel, il a été nécessaire d'aligner le banc coronographique en laboratoire sur le site. Un banc optique a été installé au laboratoire de Concordia au début de la campagne d'été en novembre 2005. Une étoile artificielle a été créée en plaçant un objectif de microscope et un trou source éclairé par un laser au foyer d'un télescope Schmidt-Cassegrain Meade de 16". Le faisceau de sortie collimaté est renvoyé au Céléstron 14 de CORONA.

A l'extérieur, CORONA est installé au pied des deux plateformes constituant l'observatoire de Concordia à 1.5 mètres au dessus du sol. Ces plateformes sont situées à 300 mètres au Sud-Ouest de la station Concordia afin d'éviter la turbulence et la pollution générées par la centrale électrique locale (Aristidi, 2005a [13]). L'instrument est commandé d'un igloo situé à 10 mètres du télescope. L'alignement polaire du télescope a été fait selon la méthode de Bigourdan sur les taches solaires et l'ajustement fin a été fait pendant les observations de l'étoile Canopus (α Carinae).

Il faut noter ici que toutes les données ont été prises de jour avec un fond de ciel important bien naturellement. Un faible temps d'intégration (10 ms) a été choisi pour geler à la fois les effets de la turbulence atmosphérique et des vibrations mécaniques de l'instrument. Aucun dispositif de suivi automatique de l'étoile n'était disponible : les acquisitions ont été faites par contrôle du champ sur la caméra Pixelfly elle-même.

4.1.2 Journal des observations et étoiles observées

La table 4.1 donne le journal des observations effectuées avec CORONA en décembre 2005.

Date	5/12/05	8/12/05	9/12/05	11/12/05	12/12/05	13/12/05
Etoile(s)	α Carinae	α Centaurii	α Centaurii α Carinae β Centaurii	α Centaurii α Carinae	α Crux	α Carinae

TAB. 4.1 – Journal des observations avec CORONA lors de la campagne de décembre 2005.

Pour cette première campagne d'observation de jour, des étoiles simples et doubles suffisamment brillantes ont été choisies :

- HD 45 348 (Canopus ou α Carinae), étoile simple la plus brillante de jour au Dôme C. Cette étoile a été choisie pour réaliser les alignements polaires et les réglages optiques fins de l'instrument. Elle est 10 fois plus brillante que le niveau moyen du fond de ciel de jour. Rappelons que ce ciel est lui même très coronal (Fossat, 2005 [45]).
- HD 128 620 (α Centaurii), étoile triple dont le compagnon le plus faible (α Centaurii ou Proxima Centaurii) est de magnitude 11 donc trop faible pour être détecté par notre instrument de jour.
- HD 108 248J (α Crux), étoile double dont la séparation agulaire est plus faible que celle d' α Centaurii.
- β Centaurii, étoile double dont les données n'ont pu être exploitées.

La table 4.2 recense les propriétés générales des étoiles observées :

Etoile Référence catalogue	Canopus HD 45 348	α Centaurii HD 128 620	α Crux HD 108 248J
Distance	96 pc	1.33 pc	98 pc
Séparation angulaire	–	14.1"	4.4"
Type spectral	F0 II	G2V	B1
Magnitude visible	-0.72	-0.01/1.33	1.4/1.8
α_{2000} (FK5)	06 ^h 23 ^m 57.11 ^s	14 ^h 39 ^m 36.20 ^s	12 ^h 26 ^m 35.90 ^s
δ_{2000} (FK5)	-52° 41' 44.4"	-60° 50' 08.2"	-63° 05' 56.7"

TAB. 4.2 – Propriétés des étoiles observées avec CORONA lors de la campagne de décembre 2005.

Au vu des déclinaisons des étoiles cibles et de la latitude du Dôme C (-75°), les distances zénithales étaient très faibles nous mettant dans des conditions favorables de seeing.

4.2 La réduction des données

4.2.1 Organisation des données et particularités

Date	Etoile	N_{sky}	N_{ref}	N_{coro}
5 décembre 2005	α Carinae	1	1	3
8 décembre 2005	α Centaurii	2	2	10
9 décembre 2005	α Centaurii	1	1	6
9 décembre 2005	α Canopus	1	1	5
9 décembre 2005	β Centaurii	1	1	4
11 décembre 2005	α Centaurii	2	2	8
11 décembre 2005	α Carinae	3	3	12
12 décembre 2005	α Crux	1	1	6
13 décembre 2005	α Carinae	1	1	2

TAB. 4.3 – Inventaire des séries de données obtenues avec CORONA en décembre 2005. N_{sky} , N_{ref} et N_{coro} correspondent respectivement aux nombres de séries d'images de fond de ciel, de référence et coronographiée qui ont été enregistrées.

Trois différents types de séries de données ont été enregistrés : des séries d'images de fond de ciel, d'images non coronographiées ou de référence et des images coronographiées. Chaque série correspond à une série de 374 poses courtes de 640x380 pixels. L'inventaire des séries de données acquises lors de la campagne d'été est répertorié dans la table 4.3.

Les processus standards de réduction de données astronomiques n'ont pas pu être utilisés pour les raisons suivantes :

- Les images ont été prises de jour : le fond de ciel est de ce fait important et les structures stellaires peu lumineuses, telles les compagons et les résidus coronographiques, émergent à peine de ce fond. De plus, la brillance du ciel n'étant pas uniforme, une simple soustraction des images de fond de ciel aux images de science ne suffit guère pour compenser ce fond.

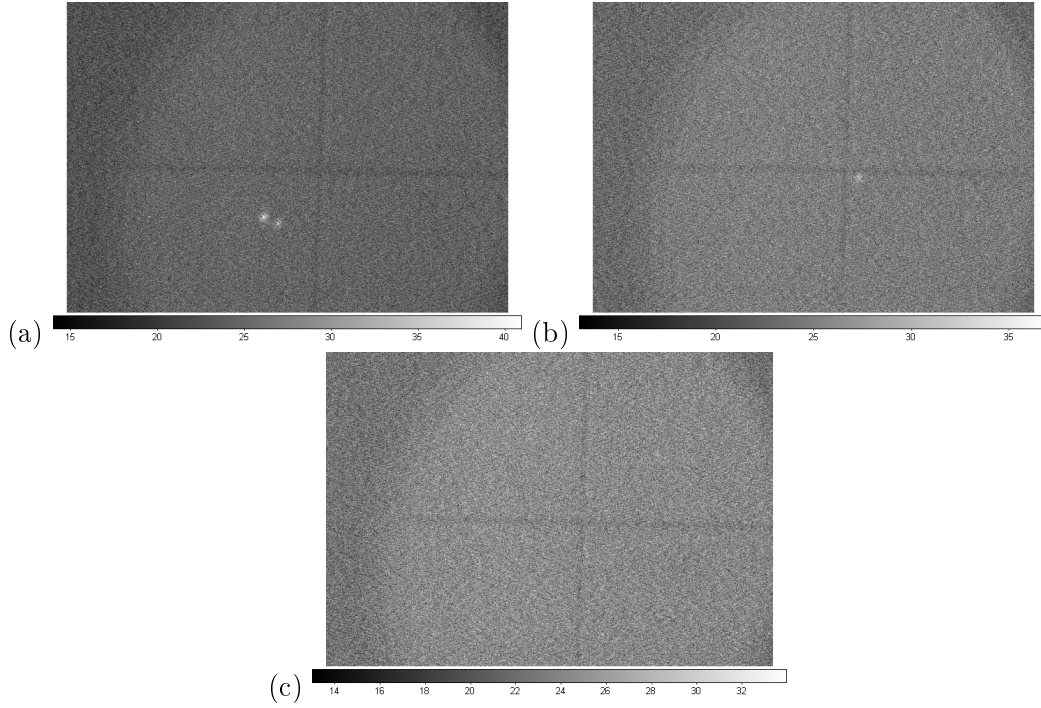


FIG. 4.2 – Exemple de poses courtes de l'étoile α Crux prises par l'instrument CORONA ($t_i = 10ms$) : images (a) de référence, (b) coronographiée et (c) de fond de ciel.

- Le software utilisé ne permettait pas d'enregistrer simultanément les images de référence et coronographiées comme initialement prévu. Ceci complique le calcul de la réjection du coronographe dont on ne peut déterminer par conséquent qu'une estimation (voir section 4.2.3).
- Les données sont sous-exposées et n'utilisent pas toute la dynamique du détecteur.
- Le profil de la PSF hors-axe n'est pas gaussien à cause de la géométrie à quatre trous de la pupille d'entrée du télescope (cf fig 3.8 et fig 4.2).
- La structure à quatre quadrants du masque coronographique est visible sur tous les types d'images en raison du haut fond de ciel. Ceci a rendu plus difficile la procédure de recentrage des images.

Il a fallu par conséquent développer une procédure particulière pour traiter correctement les données. Les grandes étapes de cette procédure sont décrites dans la figure 4.3, elles seront exposées plus en détails dans la section suivante.

4.2.2 Le recentrage-fenêtrage des images

Motivations

L'élément commun à tous les types d'images est la présence d'une croix au centre du champ. Cette croix correspond à l'ombre des interfaces entre les 4 quadrants du masque coronographique.

Cette particularité a été utilisée pour réaliser une procédure numérique de recentrage-fenêtrage de chaque image individuelle autour d'un point de référence. Le point de référence est le centre de cette croix qui correspond au centre du masque coronographique et de ce fait au centre optique de l'image. La position de ce point sur le CCD peut légèrement varier d'une image à l'autre autour

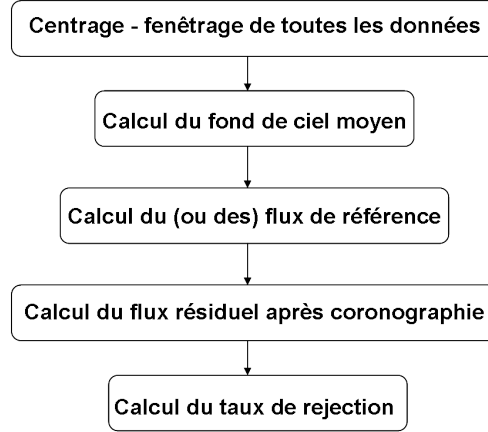


FIG. 4.3 – Principales étapes de la procédure de réduction des données de CORONA.

d'une position moyenne en raison de flexions mécaniques subies par l'instrument lui-même.

De plus, toutes les images peuvent être fenêtrées en images de 256x256 pixels centrées autour du point de référence sans perdre aucune information importante. En effet, la séparation angulaire des étoiles binaires choisies ainsi que les désalignements effectués (pour obtenir les images de référence) sont suffisamment petits pour être contenus dans ce carré central sur la caméra CCD Pixelfly. La forme carrée et taille des nouvelles images de valeur égale à une puissance de 2 ont été ainsi choisies afin d'optimiser les temps de calculs.

A la fin de la procédure, on obtient de nouveaux jeux de données pour lesquels toutes les images sont centrées et fenêtrées pour une meilleure analyse.

L'algorithme

L'algorithme de recentrage-fenêtrage des images est appliqué sur chaque image individuelle (image de fond de ciel, de référence ou coronagraphiée), selon la procédure suivante :

1. Tout d'abord, on détermine expérimentalement (visuellement) la valeur des coordonnées du centre de la croix que l'on note (C_{x0}, C_{y0}) afin de pouvoir effectuer un centrage approximatif autour de cette estimée. A partir de l'image brute, on extrait ensuite une sous-image de 256 par 256 pixels centrée sur (C_{x0}, C_{y0}) .
2. On cherche à déterminer ensuite les coordonnées (C_{x1}, C_{y1}) de la croix sur la sous-image que l'on vient d'obtenir. On somme chaque ligne de la sous-image, excepté quelques lignes près du centre qui peuvent être corrompues par le résidu stellaire. On obtient un profil d'intensité à une dimension, la figure 4.4 en montre un exemple.

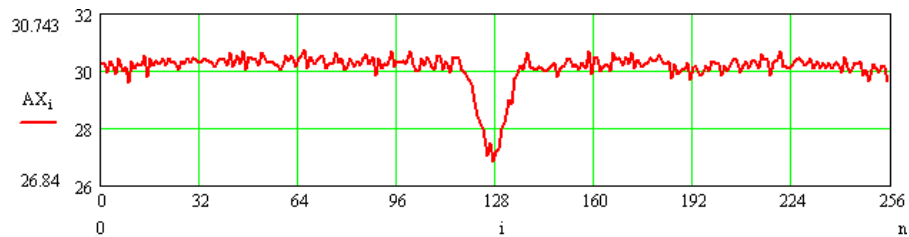


FIG. 4.4 – Exemple de profil 1D obtenu en sommant les lignes ou les colonnes d'une image.

Ce profil montre une zone localisée de déplétion près du centre puisque dans les zones de traversée de la croix l'intensité est minimale. Cependant, on voit qu'il est difficile de déterminer de manière précise la position du minimum de cette zone. Il est donc nécessaire de filtrer le profil.

3. On effectue le filtrage du profil : on calcule la Transformée de Fourier du profil et on la multiplie par une gaussienne. La valeur de l'écart type de la gaussienne est ajustée suivant la largeur du pic qui nous intéresse.
4. Enfin, la détection du minima du profil est réalisé par l'ajustement d'une parabole. On a ainsi déterminé la valeur de C_{x1} .
5. On répète le même processus en sommant les pixels de chaque colonne afin de déterminer la valeur de C_{y1} . La figure 4.5 montre un exemple des profils filtrés obtenus pour chaque dimension.

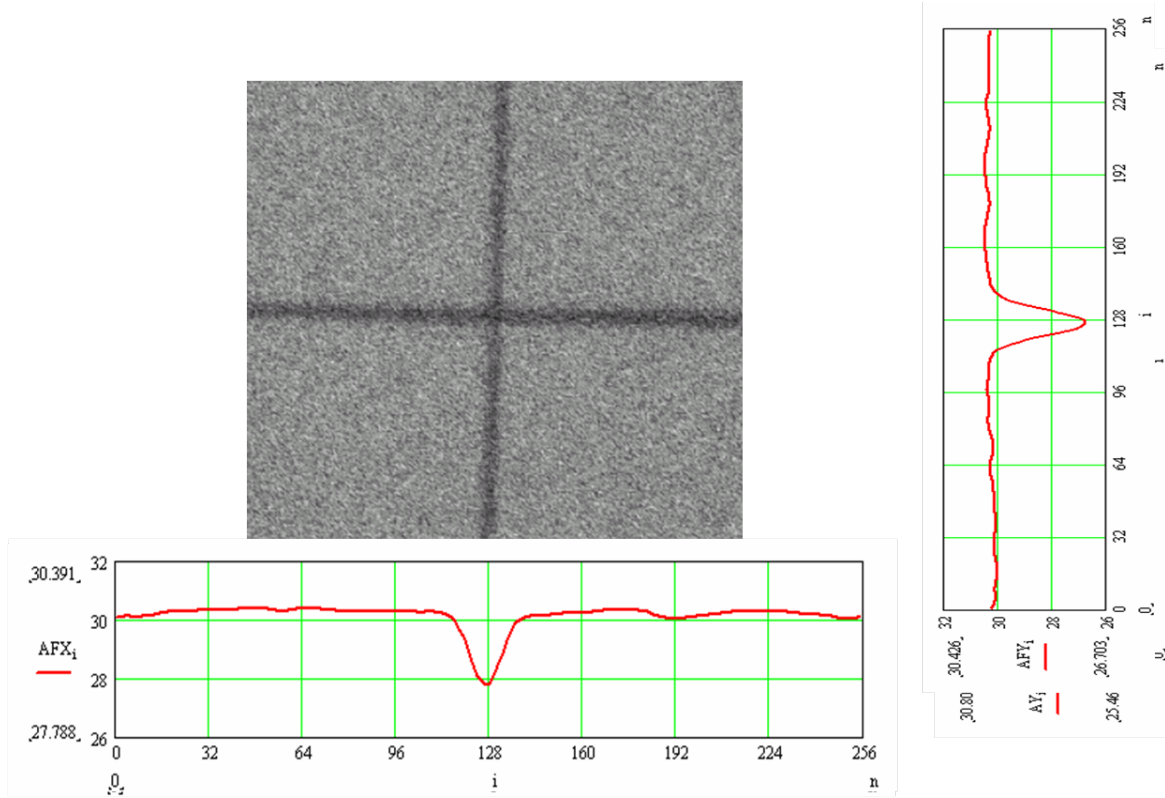


FIG. 4.5 – Illustration de l'algorithme de recentrage des images : la détermination des coordonnées du centre de la croix est possible après le filtrage des profils 1D.

6. A partir de l'image originale de 640x280, une nouvelle sous-fenêtre de 256x256 pixels centrée sur (C_{x1}, C_{y1}) est extraite. La correction du centrage est effectuée par translation. On utilise la propriété remarquable de la transformée de Fourier suivante :
Si $f(x,y)$ a pour transformée $F(u,v)$ alors $g(x,y) = f(x - x_0, y - y_0)$ a pour transformée :

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot e^{-j(ux_0 + vy_0)}$$

Pour ce faire, on implémente l'algorithme suivant :

- multiplication par -1^{x+y} puis transformée de Fourier,
- multiplication par un tableau de facteurs de phase,
- transformée de Fourier inverse puis multiplication par -1^{x+y} .

Le nouveau fenêtrage est ensuite effectué par simple recopie sans interpolation.

7. Une nouvelle détection du centre de la croix selon le même processus est effectuée pour vérification et pour affiner la précision du centrage.

Statistiquement, le centrage effectué est obtenu avec une précision :

- de 0.1 pixels pour les images de fond de ciel,
- de 0.1 pixels pour les images non coronographiées,
- de 0.3 pixels pour les images coronographiées.

La procédure peut être réitérée si une meilleure précision est souhaitée.

4.2.3 Photométrie sur les images non-coronographiées

Position du problème

Les séries d'images de référence et coronographiées n'ayant pas été enregistrées simultanément, il n'est pas possible de comparer deux à deux une pose courte de référence avec une pose courte coronographiée pour déterminer les performances coronographiques. Un manque de précision dans le calcul de la réjection peut apparaître en raison des variations temporelles de la brillance du ciel.

Pour pallier à ce problème, il faut procéder à des estimations du flux stellaire de l'image de référence à l'instant où l'image coronographiée a été enregistrée. Il a été décidé de déterminer le flux moyen de référence par série de données. On note $I_{ref}^{(*)}$ le flux moyen de référence et $I_{ref}^{(c)}$ celui du compagnon dans le cas d'une étoile double.

L'algorithme

Les images de référence ont été enregistrées avec l'étoile clairement hors-axe (cf fig 4.2). Sur chaque image de référence centrée et fenêtrée, on applique la procédure suivante dont les principales étapes sont données dans la figure 4.6 :

1. On soustrait le fond de ciel moyen.
2. On détecte ensuite la position du centre de l'étoile principale en recherchant les coordonnées du pixel le plus brillant de l'image. Ceci nous permet alors de savoir dans quel quadrant se situe l'image de l'étoile.
3. On détermine ensuite la statistique du niveau photométrique du bruit de fond résiduel après soustraction du dark, c'est-à-dire sa valeur moyenne m ainsi que son écart-type σ .
Il apparaît en effet que le niveau moyen m n'est pas tout à fait nul bien que le dark ait été soustrait ; ceci est principalement dû à de légères variations de la brillance du ciel. Ce fond résiduel n'est pas négligeable et doit être pris en considération.

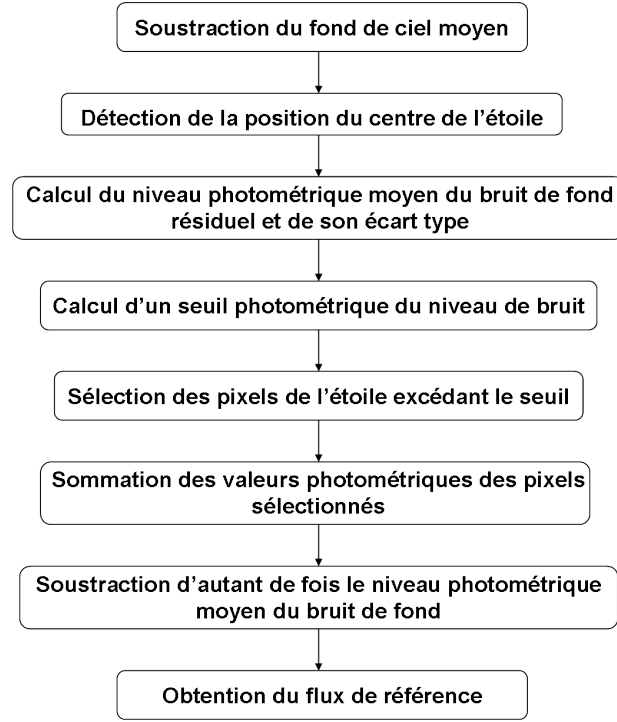


FIG. 4.6 – Etapes du programme de photométrie sur les images non-coronographiées.

Pour ce faire, on les détermine dans trois carrés de 100 x 100 pixels chacun situés dans les trois quadrants de l'image où il n'y a pas d'étoile. La position de chaque carré est repérée à partir du coin de l'image auquel il appartient afin d'éviter les pixels qui appartiennent à la croix.

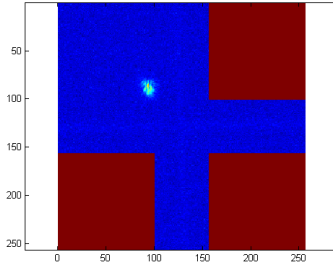


FIG. 4.7 – Illustration de l'algorithme de calcul du niveau photométrique moyen du bruit de fond résiduel : positionnement des trois carrés à partir desquels le calcul est effectué.

4. On calcule ensuite un seuil photométrique S correspondant au bruit de l'image. La valeur de ce seuil est définie de la manière suivante :

$$S = m + k * \sigma$$

où k est un coefficient compris entre 2 et 3 dont la valeur peut être ajustée pour chaque jeu de données¹.

¹Une méthode plus sophistiquée a été testée pour estimer le seuil du bruit à partir d'histogrammes et a conduit

5. On sélectionne dans l'image les pixels voisins du centre de l'étoile qui dépassent cette valeur seuil. Cette sélection des pixels s'effectue dans une zone circulaire centrée sur l'étoile et dont le diamètre a été convenablement choisi pour contenir tout le flux stellaire. On note N le nombre de pixels sélectionnés.

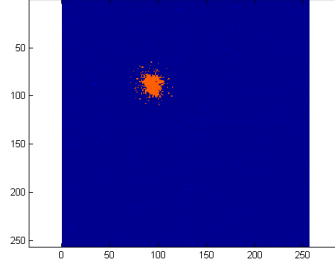


FIG. 4.8 – Illustration de l'algorithme de sélection des pixels : visualisation des pixels sélectionnés.

6. Le flux brut de l'étoile est obtenu par sommation des valeurs photométriques des N pixels sélectionnés.
7. Le flux brut obtenu est lui-même corrigé du fond de ciel résiduel : l'estimée finale du flux stellaire est simplement obtenue en soustrayant au flux brut N fois la valeur du niveau photométrique moyen m du bruit de fond résiduel.
8. Pour les étoiles binaires, le flux photométrique du compagnon doit aussi être estimé. Pour ce faire, les valeurs pixels de l'étoile et de son voisinage sont mises à zéro et l'on applique à nouveau l'algorithme qui vient d'être décrit.

De plus, plusieurs tests sont effectués afin d'éliminer les mauvaises poses courtes. En effet la pose courte est rejetée si :

- l'étoile n'est pas correctement centrée sur le coronographe,
- le nombre de pixels sélectionnés dépassant le seuil est inférieur à 10.

Enfin, pour chaque série de données, on calcule les flux moyens de référence $I_{ref}^{(*)}$ et $I_{ref}^{(c)}$ respectivement de l'étoile et de son compagnon en moyennant les flux individuels calculés pour l'ensemble des poses courtes retenues.

4.2.4 Photométrie sur le résidu coronographié

Les étapes de l'algorithme sont presque les mêmes que celles de la section précédente à deux exceptions près :

- La première différence est que, cette fois-ci, c'est le compagnon qui est plus brillant que le résidu de l'étoile centrale qui a été coronographiée. C'est pourquoi, on commence d'abord par la photométrie du compagnon après la détection du pixel le plus brillant de l'image (ce qui est par ailleurs rassurant sur la capacité d'extinction du coronographe).
- La deuxième différence est que l'on connaît la position de l'étoile centrale : proche du point de référence, le centre de la croix puisqu'on la coronographie, elle est donc proche du centre de l'image.

De plus, plusieurs tests sont effectués afin de décider si on sélectionne ou non la pose. La pose est rejetée si :

- il est impossible de déterminer la position du photocentre du compagnon
- le nombre de pixels sélectionnés pour calculer le flux de l'étoile centrale est inférieur ou égal à 15
- le nombre de pixels sélectionnés pour calculer le flux du compagnon est inférieur ou égal à 10

Pour chaque image coronographiée, on obtient les flux coronographiés après application de l'algorithme de la section 4.2.3 que l'on appelle respectivement $I_{cor}^{(*)}$ pour l'étoile centrale et $I_{cor}^{(c)}$ pour le compagnon.

4.2.5 Détermination du taux de réjection

On définit le taux de réjection R de la manière suivante :

$$R = \frac{\text{Flux moyen des images non coronographiées}}{\text{Flux résiduel après coronographie}} = \frac{I_{nc}}{I_{cor}},$$

I_{cor} est le flux photométrique coronographique de l'étoile et I_{nc} est le flux photométrique que l'étoile déplacée hors de l'axe aurait eu *au même instant*.

La meilleure estimée pour l'intensité coronographiée non simultanée I_{nc} est l'intensité de référence I_{ref} , mesurée quelques minutes auparavant.

Cependant, dans le cas d'une étoile binaire, l'intensité du compagnon garde des traces des variations possibles de la brillance du ciel, en supposant que l'image du compagnon est suffisamment éloignée de l'axe coronographique à la fois pour les images de référence et coronographiées.

Si le compagnon émerge suffisamment clairement du bruit de fond, l'intensité instantanée non coronographiée $I_{nc}^{(*)}$ peut être estimée à partir de l'intensité de référence $I_{ref}^{(*)}$ de la manière suivante :

$$I_{nc}^{(*)} = I_{ref}^{(*)} \times \frac{I_{nc}^{(c)}}{I_{ref}^{(c)}}.$$

4.3 Les résultats

4.3.1 Premières évaluations de réjection sur une étoile simple

La table 4.4 recense les réjections obtenues par série et par date pour l'étoile simple Canopus.

Date	Réjection par série				
5 décembre 2005	1 3,7	2 9,0	3 7,6		
9 décembre 2005	1 11,2	2 13,9	3 10,9	4 12,8	5 11,2
11 décembre 2005 1 ^{er} run	1 31,8	2 16,5	3 6,3	4 6,3	
11 décembre 2005 2 ^{ème} run	1 22,1	2 9,8	3 11,0		
11 décembre 2005 3 ^{ème} run	1 21,0	2 15,6	3 14,3	4 16,3	5 17,7
13 décembre 2005	1 7,5	2 9,9			

TAB. 4.4 – Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile simple Canopus pour les journées des 05, 09, 11 et 13 décembre 2005.

On peut voir une grande variabilité de la réjection d'un jour à l'autre et même d'une série à l'autre au sein d'une même journée. Il faut préciser que les séries de données faisant partie d'un même run ont été prises à quelques minutes d'intervalles. Une explication possible est la variation du gradient de température qui passe par un minimum au lever et au coucher du soleil engendrant un excellent seeing à ce moment là. La valeur maximale de la réjection obtenue est de 32. La figure 4.9 montre la meilleure pose courte coronographiée de réjection 32 ainsi qu'une pose courte de référence afin de pouvoir comparer.

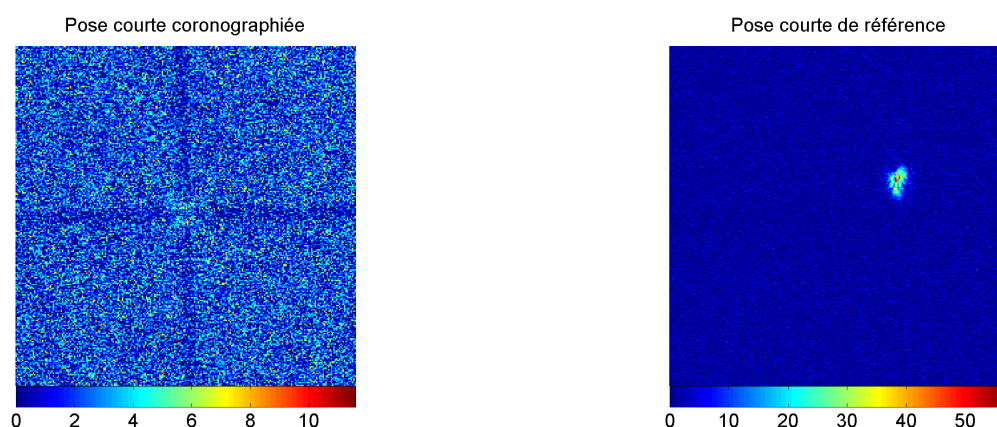


FIG. 4.9 – Meilleure pose courte coronographiée de Canopus (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).

4.3.2 Evaluations de réjection sur une étoile double

α Centaurii

Les réjections obtenues par série sont recensées dans la table 4.5. Pour α Centaurii, la réjection maximale atteinte est supérieure à 32 comme on peut le voir sur la figure 4.5. On retrouve une grande variabilité des performances d'un jour et d'un instant à l'autre.

Date	Réjection par série					
8 décembre	1	2	3	4		
1 ^{er} run	30,6	32,3	12,3	20,9		
8 décembre	5	6	7	8	9	10
2 ^{ème} run	14,4	14,4	10,3	9,8	14,2	17,9
11 décembre	1	2	3	4	5	
1 ^{er} run	23,4	20,1	30,4	9,5	20,3	
11 décembre	1	2	3			
2 ^{ème} run	31,9	28,0	22,1			

TAB. 4.5 – Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile double α Centaurii pour les journées des 08, 09 et 11 décembre 2005.

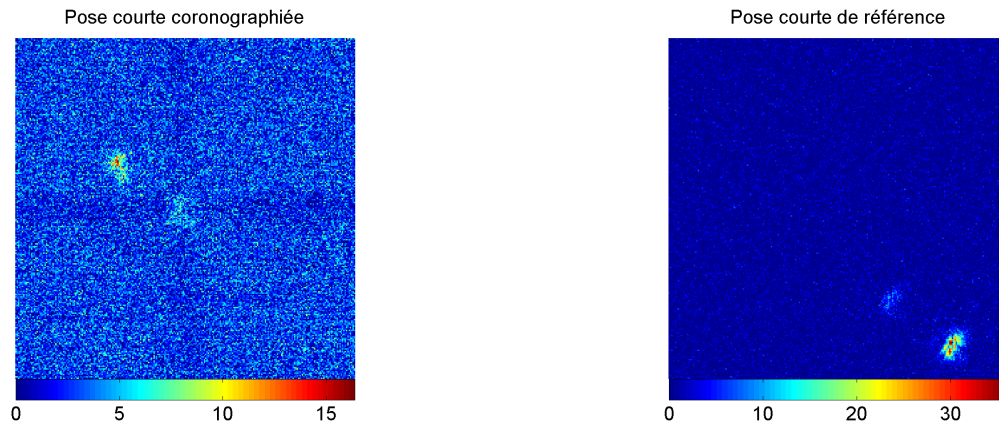


FIG. 4.10 – Meilleure pose courte coronographiée d' α Centaurii (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).

α Crux

Journée du 12 décembre 2005						
Numéro de la série	1	2	3	4	5	6
Réjection maximale	16.0	17.6	13.4	14.9	14.9	13.1

TAB. 4.6 – Inventaire des valeurs des taux de réjection maximum obtenus par série pour l'étoile double α Crux pour la journée du 12 décembre 2005.

La table 4.6 fait l'inventaire des meilleurs taux de réjection obtenus pour α Crux. Les résultats sont cohérents d'un série à l'autre et la réjection maximale avoisine les 18.

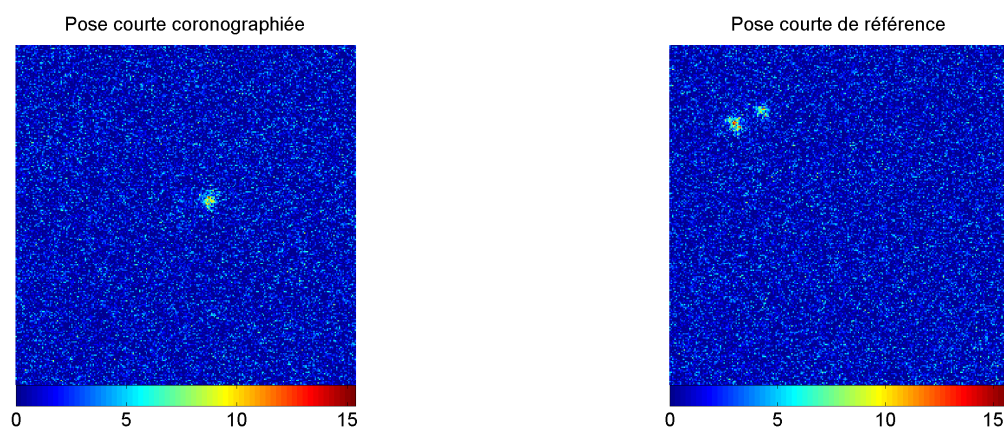


FIG. 4.11 – Meilleure pose courte coronographiée d' α Crux (gauche) ainsi qu'une pose courte de référence pour comparaison (droite).

Pour expliquer la variabilité des résultats au cours d'une même journée, Eric Aristidi m'a fourni les données journalières du seeing enregistrées par l'instrument DIMM. Hélas, il n'a pas été possible d'établir une corrélation entre l'évolution des performances et le seeing. Ceci signifie que c'est l'instrument lui-même qui limite les performances.

4.3.3 Synthèses des valeurs de réjection obtenues lors de la première campagne d'été de CORONA

La table 4.7 recense les données statistiques sur les performances coronagraphiques mesurées pour cette première campagne d'observation de jour au Dôme C. Peu de poses courtes ont des taux de réjection supérieurs à 20 ; des valeurs de taux de réjection supérieures à 30 sont plutôt exceptionnelles. Cependant, le grand nombre de poses courtes dont le taux de réjection est supérieur à 10 est très encourageant pour la suite puisqu'il s'agit d'observations de jour.

Date	Seeing	Etoile	n	R_{max}	$n_{>10}$	$n_{>20}$	$n_{>30}$
051205	0,7	α Carinae	1122	9,0	0	0	0
081205	0,7	α Centaurii	3740	32,3	141	16	3
091205	0,7	α Carinae	1870	13,9	13	0	0
	0,7	α Centaurii	2244	0	0	0	0
	0,7	β Centaurii	1496	0	0	0	0
111205	0,6	α Centaurii	2992	31,9	881	84	4
	0,8	α Carinae	4488	31,8	743	13	1
121205	0,5	α Crux	1870	17,6	228	0	0
131205	0,6	α Carinae	748	9,9	0	0	0

TAB. 4.7 – Statistique des meilleurs snapshots en considérant les performances coronagraphiques. s est le seeing médian (obtenu à partir de mesures du DIMM), n est le nombre total d'images, $n_{>10}$ est le nombre total d'images de réjection supérieure à 10, et ainsi de suite.

A partir de ces statistiques, il est possible d'obtenir des poses longues pour chaque étoile en sélectionnant les poses courtes dont la réjection est suffisante. Pour Canopus, les 743 poses courtes coronographiées du 11 Décembre 2005 dont la réjection est supérieure à 10 ont été moyennées. Afin d'effectuer une comparaison visuelle une pose longue de référence a également été calculée en moyennant le jeu complet des 374 images de référence prises à la même date. La pose longue coronographiée d' α Centaurii est obtenue à partir des 881 poses courtes de réjection supérieure à 10 du 11 Décembre 2005, et celle d' α Crux à partir des 228 poses courtes de réjection supérieure à 10 du 12 Décembre 2005. La figure 4.12 montre les poses longues obtenues.

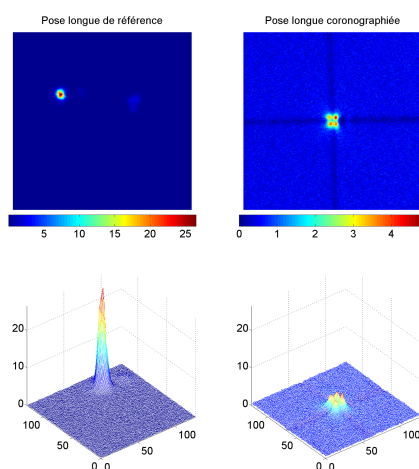
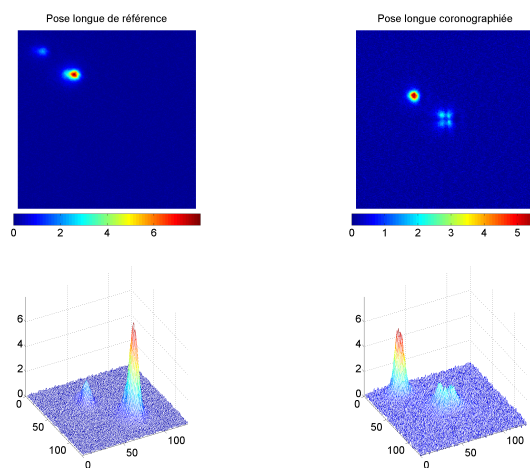
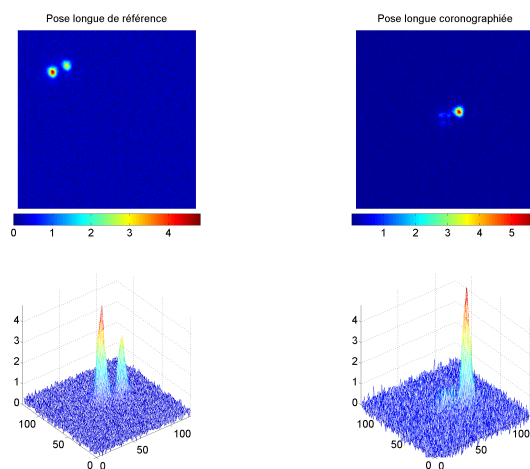
Canopus α Centaurii α Crux

FIG. 4.12 – Poses longues (gauche) de référence et (droite) coronagraphiées des étoiles Canopus, α Cen et α Crux.

4.4 Discussion

Afin d'interpréter correctement les résultats observationnels obtenus, plusieurs éléments sont à prendre en compte :

- **Les données ont été prises de jour avec un fond de ciel important.** Certaines des meilleures poses courtes coronographiées ont du être rejetées car un nombre trop faible de pixels émergeait du bruit et donc aucun signal du résidu stellaire n'a pu être extrait. Par conséquent, la meilleure valeur obtenue de 32 pour le taux de réjection constitue seulement une limite inférieure qui est dominée en grande partie par le bruit de fond de ciel résiduel et non pas par le coronographe lui-même. Ce problème ne se posera pas lors d'observations de nuit.
- **Le masque coronographique n'est pas parfaitement achromatique.** La courbe donnant l'évolution du déphasage du masque à couteaux de phase en fonction de la longueur d'onde s'écarte de sa valeur idéale de π et ce surtout en dessous de 400 nm. Selon un calcul effectué par Jean-Pierre Rivet, si l'on prend en compte la sensibilité actuelle de la caméra de science ainsi que la transmission théorique de la chaîne optique, la valeur du taux de réjection large bande attendu dans le domaine du visible n'est que de 67. Cependant, cette valeur théorique pourrait dépasser les 2000 avec l'ajout d'un filtre UV coupant les radiations de longueur d'onde inférieure à 420 nm.
- **Le coronographe est très sensible aux effets de la turbulence atmosphérique et en particulier aux effets de tip-tilt ou de basculement du front d'onde ainsi qu'aux défauts de suivi de l'étoile** (Riaud, 2001 [87]). Cette particularité est commune à tous les coronographes stellaires susceptibles de produire d'excellentes performances d'extinction à des séparations très faibles de l'étoile. L'instrument CORONA ne disposait ni d'un système d'optique adaptative ni au minimum d'un correcteur de tip-tilt ni d'un suiveur d'étoile. Tout ceci réduit considérablement les performances attendues de l'instrument mais est plutôt encourageant pour une coronographie nocturne avec les équipements adéquats.
- **Le banc coronographique a besoin d'être préalablement parfaitement aligné en laboratoire avant toute opération sur le ciel.** Cette opération n'a pu être correctement effectuée car le laboratoire optique de CONCORDIA est en cours d'installation et ne disposait pas des moyens de réglage optique suffisants à la date de ces tests.
- **La qualité optique de CORONA n'est pas limitée par la diffraction même en présence d'un bon seeing.** Des aberrations sont apparues au niveau du télescope ; des recherches doivent être faites pour déterminer leurs origines.

4.5 Premier hiver infructueux de CORONA au Dôme C

L'arrivée de la tombée de la nuit au Dôme C sonne le moment propice pour commencer l'exploitation de CORONA. CORONA avait fonctionné fin Février 2006 pour contrôler que tout allait bien depuis la campagne d'été, et était en sommeil depuis.

Cependant, les températures ont chuté depuis pour atteindre des valeurs autour de -65°C dans la nuit. Les télescopes sont mécaniquement prévus pour fonctionner dans de telles conditions mais l'optique souffre, en particulier le télescope de CORONA qui était le seul télescope présent au Dôme C dont la pleine ouverture était utilisée à cette époque pour faire des images : en effet, les télescopes du DIMM et des 2 GSM sont diaphragmés à de petites ouvertures de 6 cm de diamètre et le SSS travaille en image pupillaire défocalisée. Il semblerait de plus que l'optique du Meade 16 du SSS est supérieure au Célestron 14 de CORONA .

Les dernières images obtenues avec CORONA en mars 2006 ont montré d'importantes aberrations optiques conduisant à des images de forme triangulaire et très empâtées, comme le montre l'image de l'étoile Sirius sur la figure 4.13 ci-dessous : le diamètre de l'image devrait être de l'ordre de 1" à 2", il est plutôt de 15". Ces aberrations sont causées par des tensions sur l'un des



FIG. 4.13 – PSF de CORONA durant l'hiver 2006 au Dôme C.

deux miroirs du télescope (ou les deux). Il est probable qu'avec le froid, les pièces mécaniques qui supportent l'optique se soient rétractées, créant des tensions au niveau des miroirs primaires et secondaire qui modifient leur surface. Et l'optique astronomique ne tolère pas de défauts plus grands que le dixième de micron environ.

CORONA n'a donc malheureusement pas pu fonctionner durant l'hivernage 2006.

Un remède direct serait de changer le miroir secondaire en le remplaçant par un miroir de Zerodur alors que celui du Célestron 14 actuel est en pyrec nervuré triangulairement.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

J'ai présenté les résultats de la première lumière au Dôme C du premier coronographe stellaire antarctique, le coronographe à couteaux de phase CORONA. Cet instrument constitue un instrument pilote de démonstration des qualités astronomiques du site Dôme C en vue de l'implémentation à plus ou moins long terme d'un véritable observatoire. Il est à distinguer des instruments jusqu'ici déployés sur ce site pour sa qualification pour l'astronomie antarctique. Les performances coronagraphiques obtenues, des valeurs de taux de réjection de l'ordre de 32, sont encourageantes étant donné l'absence de tout élément d'optique adaptative. De plus, ces premiers tests sur le ciel sont à l'origine de nombreux retours d'expérience d'observation in situ dont bénéficiera la préparation des futurs projets d'instruments astronomiques à Concordia.

CORONA a été renvoyé à Nice pour y recevoir certaines améliorations. Certaines limitations apparues lors de cette première campagne d'observations pourront être ainsi contournées :

- étude complémentaire de la "customization" du télescope pour l'Antarctique,
- implémentation d'un système suiveur d'étoile automatique fonctionnant à partir des données enregistrées par la caméra de monitoring,
- installation d'un système correcteur du tip-tilt,
- implémentation de l'algorithme de sélection automatique des images à partir de la caméra de monitoring proposé et décrit par Lyu Abe (Abe et al., 2007 [4]),
- ajout d'un filtre UV adéquat afin d'améliorer l'efficacité du coronographe (cf section 4.4),
- combinaison de l'instrument avec une caméra à comptage de photons rapide et sensible qui est en cours de développement à Fizeau.

Ces observations de validation sont importantes pour les futurs développements à long terme de programmes ambitieux au Dôme C. Ces programmes incluront à la fois des instruments d'imagerie à fort contraste et à haute résolution angulaire tels que les coronographes et les interféromètres nulleurs ou imageurs.

Par ailleurs, depuis ces premiers tests, la caractérisation du site du Dôme C s'est poursuivie notamment durant l'hiver (Agabi et al., 2007 [5]) : le seeing y est excellent (0.36") au dessus d'une couche limite de 36 mètres. Deux solutions sont envisagées, la construction d'une tour ou le recours à un système d'optique adaptative dit "à couche limite" (Ground Layer Adaptive Optics).

Ces perspectives justifient de ce fait de réaliser progressivement l'expérience "pilote" CORONA notamment l'ajout de système de correction du tip-tilt et des bas ordres de la turbulence atmosphérique. L'objectif immédiat est d'installer notre APKC au foyer du télescope italien IRAIT (Tosti et al., 2006 [102]) qui est en cours d'installation au Dôme C et dont le fonctionnement est prochainement prévu pour 2008-2009.

D'après Elhalkouj et al. (2008 [42]), l'angle isopistonique au Dôme C permettrait d'utiliser une optique adaptative à couche limite (GLAO) afin d'améliorer les performances d'un instrument imageur tel que CORONA. De ce fait, CORONA est un instrument qui peut s'adapter tel quel au foyer d'IRAIT mais aussi du télescope de 2.5m WHITE (Wild-field High-resolution Infrared Telescope, Burgarella et al., 2007). On peut imaginer de mettre une optique adaptative à l'intérieur de CORONA en complément au système GLAO. Ce dernier corrigerait les bas ordres de la turbulence et serait en mesure de corriger les speckles résiduels derrière le coronographe et gagner encore en contraste.

Par ailleurs, le travail effectué a donné lieu à la rédaction d'un article qui a été soumis à PASP et qui est présenté dans le chapitre qui suit.

Chapitre 6

Article soumis à PASP

First Light from the Dome C (Antarctica) of a phase knife stellar coronagraph

G. Guerri

*Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice (LUAN), CNRS UMR 6525,
Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 02, France
guerri@unice.fr*

L. Abe

*Optical and Infrared Division & Extrasolar Planet Project Office,
National Astronomical Observatory of Japan,
Osawa 2-21-1, Mitaka-City, 181-8588 Tokyo Prefecture, Japan*

J.-B. Daban, E. Aristidi and P. Bendjoya

*Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice (LUAN), CNRS UMR 6525,
Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 02, France*

J.-P. Rivet

*Laboratoire Cassiopée, CNRS UMR 6202, Observatoire de la Côte d'Azur,
B.P. 4229, Nice Cedex 04, France
and*

F. Vakili

*Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice (LUAN), CNRS UMR 6525,
Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 02, France*

ABSTRACT

We report on the first daytime on-sky results of an Achromatic Phase Knife stellar Coronagraph (APKC) operated in the visible domain from the French-Italian Concordia station at Dome C (Antarctica). This site has proven in the last few years to offer excellent atmospheric seeing conditions for high spatial resolution observations.

The coronagraphic performances obtained from laboratory experiments and numerical models have been compared with those measured from daytime on-sky data recorded on bright single and multiple stars: Canopus (HD 45 348), α Centauri (HD 128 620J) and α Crux (HD 108 248J). No adaptive correction system was used (adaptive optics or even tip-tilt mirror) so that atmospheric turbulence alone defines the image quality, and thus the coronagraphic performance.

Satisfactory results have been obtained: broad band rejection rate values exceeding 30 were achieved. This first day-time observation campaign yields an experimental feedback on how to improve the instrument to get optimal performances during future night-time observation runs.

Subject headings: Astronomical Instrumentation

1. Introduction

1.1. Context

Since the unambiguous discovery of the first extrasolar planet by Mayor and Queloz (1995), the competition to obtain direct images of an exoplanet has been launched. However, the huge contrast between the planet and its host star (10^9 to 10^6 depending on the spectral domain and on the planet's type) requires the use of new high dynamic range imaging instruments. Stellar coronagraphy is a promising technique to overcome this brightness gap, as recently proven by Neuhauser et al. (2007) with the direct detection of an exoplanet in the system γ Cephei. In this context, several coronagraphic concepts have been proposed by the community: Roddier & Roddier phase mask coronagraph (Roddier & Roddier 1997), achromatic interferometric coronagraph (Gay and Rabbia 1997), four quadrant/phase knife coronagraph (Rouan et al. 2000; Abe et al. 2001) or pupil apodized Lyot coronagraph (Aime et al. 2002). Nevertheless, the main limitations of ground-based coronagraphs are the atmospheric turbulence and the performances of adaptive optics systems: currently, good on-sky coronagraphic performances are difficult to obtain, even with the best adaptive optics system.

The Dome C site provides unique environmental conditions for astronomical observations thanks to its great atmosphere stability and subsequent low turbulence. That is why a ground-based telescope equipped with an adaptive optics system and installed at Dome C should be very competitive.

The experiment we describe in this paper constitutes a precursory instrument from a technical point of view (regarding the coronagraphic mask, the acquisition system and the operation in extreme conditions). This experiment will enable a better apprehension of a more complete instrument (equipped in priority with a residual tip-tilt corrector and an adaptive optics system), before the next installation on a larger telescope.

1.2. The Concordia station

The Concordia station was constructed by the French (IPEV) and Italian (PNRA) polar insti-

tutes. Two entire winterovers have already been achieved since 2005. The station is located on the Dome C site of the Antarctic plateau (75°S , 123°E), at an elevation of 3250 m, which corresponds to an air pressure met around 3800 m at more equatorial latitudes. The first results of the site testing present Concordia as an exceptional site for observational astrophysics. The daytime seeing measurements (Aristidi et al. 2005a,b) were based on DIMM data, during two summer campaigns (3 months each) in 2003-2004 and 2004-2005. They found a median seeing of $0.54''$ and a median isoplanatic angle of $6.8''$ above ground level (> 8.5 m altitude). The following nighttime measurement campaign (Agabi et al. 2006), however, showed that the median seeing measured 30 m above the ground level was equal to $0.36''$, with exceptionally low refractive index structure constant and wind speed profiles, challenging top-ranked observing sites like Paranal or Mauna-Kea. These results strongly encourage the astronomical community to consider Dome C as a possible site for the construction of a new large observatory mainly dedicated to high dynamic range imaging observations. In this context, and before the installation of greater scale instruments, we present test experiments of an achromatic visible stellar coronagraph which are currently being conducted at Dome C, in parallel to the site qualification.

1.3. Four quadrant achromatic phase mask coronagraph

We recall the principle of an Achromatic Phase Knife Coronagraph (APKC) (Rouan et al. 2000; Abe et al. 2001). The APKC coronagraphic mask is a phase mask divided into four equal quadrants where the phase shift is respectively 0 , π , 2π , 3π . It has to be placed in the focal plane of the telescope. After the phase mask, a relay lens re-images the pupil. An iris diaphragm called Lyot stop is placed in the relayed pupil plane so as to block the light rejected by the coronagraphic mask out of the geometrical image of the pupil. Then, a last lens re-images the focal plane onto the camera. In this final focal plane, the residual starlight would completely vanish in ideal conditions (no turbulence, no aberrations, perfectly centered star, perfect and spatially unlimited coronagraphic mask). However, in real conditions, the final coronagraphic image is not totally dark: the

residual on-axis PSF halo has a particular light distribution similar to “butterfly’s wings”. The intensity level and exact shape of the halo of this final image mostly depends on the actual field of view at the coronagraphic mask location (see, e.g. Abe et al. 2001).

Since the performances of such a coronagraph are very sensitive to atmospheric turbulence, it is necessary to implement the experiment on a site benefiting from very good atmospheric seeing conditions, especially if no adaptive optics is available.

2. The CORONA instrument

CORONA (for CORONagraph in Antarctic) is a compact achromatic phase knife stellar coronagraph coupled to a 14 inches telescope. The instrument has been designed to work in the visible and has been customized to withstand Antarctic conditions.

2.1. The achromatic phase knives

Following an earlier development, the two concepts of the achromatic phase knife coronagraph (Abe et al. 2001) and the four-quadrant phase mask coronagraph (Rouan et al. 2000) have been merged to simplify the design of the coronagraphic mask: a first prototype of the APKC coronagraph has already been successfully realized and tested at the focus of a 50 cm refractor at the Observatoire de Nice (Abe et al. 2007). Special R&D has been completed to adapt the phase mask to Dome C low temperatures. The mask is an assembly of two crossed pairs of phase plates. Each phase plate, called phase knife (by analogy to the Foucault’s optical knife test), has the same thickness but different refraction indices.

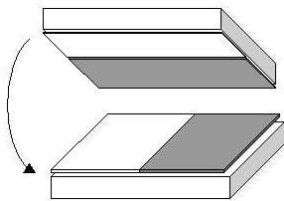


Fig. 1.— The optical assembly of the APKC coronagraphic mask: two $99\ \mu\text{m}$ phase knives are stacked between two 6 mm thick glass plates.

As shown in Fig. 1, the two $99\ \mu\text{m}$ phase knives are blocked between two thick glass plates. This kind of complex optical component requires multiple assembly steps involving both molecular bonding and gluing. To avoid penetration of humidity, an external coating is necessary: the coronagraphic mask is covered with a flexible glue which withstands -70°C . Finally, a few weeks drying is necessary for the mask to be operational.

Because of the large temperature difference between Dome C and tempered sites, the optical properties of the phase mask were found to vary significantly at low temperatures. Figure 2 shows the expected relative phase shift error $(\Delta\phi - \pi)/\pi$ of the phase knives as a function of the wavelength, for “European” temperatures ($+10^\circ\text{C}$) and for Antarctic temperatures (-30°C , -40°C , -50°C). The effect of the temperature on both the thickness and the refractive index of the plates is taken into account.

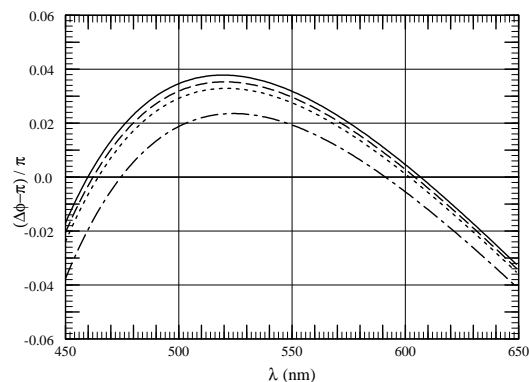


Fig. 2.— The relative error on the π phase-shift of the phase knives, as a function of the wavelength, for different temperatures. Solid curve: -50°C . Dashed: -40°C . Dotted: -30°C . Dash-dotted: $+10^\circ\text{C}$.

2.2. The coronagraphic setup

Figure 3 shows the coronagraphic optical bench which is mounted on the side of the telescope. The beam passes through a beam-splitter which transmits 80% of the light to a monitoring camera, a standard CCIR Watec camera (for further use; see Sect. 6). The remaining 20% of the beam are reflected to the science camera through the coronagraph. The coronagraphic phase mask is

placed at the focus of the telescope after the beam splitter. After the phase mask, the relay lens L_1

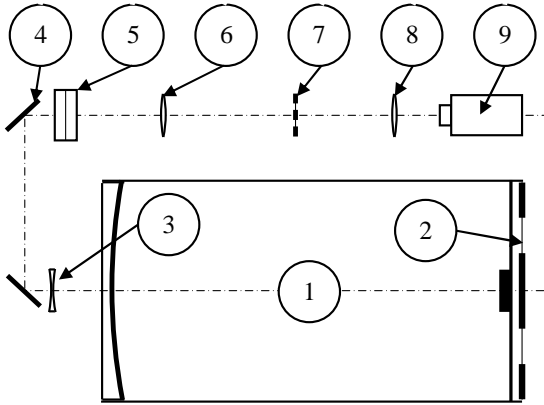


Fig. 3.— CORONA’s optical setup. (1): 14’’ Schmidt-Cassegrain telescope. (2): Aperture mask. (3): Barlow lens. (4): Beam splitter. (5): Achromatic phase knives coronagraphic mask. (6): Relay lens L_1 . (7): Lyot stop. (8): Imaging lenses L_2 and L_3 (two different lenses that can be switched to image either the pupil plane or the image plane on the camera). (9): Science camera.

($f_1 = 150$ mm) re-images the entrance pupil. The Lyot stop is placed at the relayed pupil plane. Then, two imaging lenses L_2 ($f_2 = 75$ mm) and L_3 ($f_3 = 50$ mm) can be switched to image respectively the focal image or the pupil image onto the science camera. Indeed, the pupil image is required for the preliminary optical alignment procedure.

The science CCD camera, a PCO Pixelfly, is placed into an insulated and thermally controlled box. The typical temperature inside the box is thus around -15°C , and rises up to 0°C on the CCD chip because of thermal dissipation.

2.3. The telescope

CORONA’s telescope is a Schmidt-Cassegrain Celestron 14 telescope (diameter 355 mm) with a Barlow lens (equivalent focal length 24 406 mm). The telescope is placed on an equatorial Astro-Physics1200 mount. The mount is placed on a massive wooden foot (Aristidi et al. 2005b).

The mechanical structure of the telescope has been modified to withstand Antarctic conditions.

The original aluminium alloy optical tube has been replaced by an InvarTM tube. Indeed, the thermal expansion coefficient for InvarTM is more than ten times lower than for aluminium alloys. The two mirrors of the telescope are also glued to their holder according to a special procedure. Finally, all moving mechanical parts are dry-cleaned then lubricated with a grease which remains viscous down to -80°C .

It is known that the telescope’s central obscuration would significantly alter the coronagraphic nulling efficiency (Riaud et al. 2001). However, Lloyd et al. (2003) proposed several entrance pupil geometries allowing better coronagraphic performance when a central obscuration is present, but of course at the expense of a loss of transmission. The new entrance pupil is composed of four equal holes surrounding the central obscuration (see Fig. 4). The pupil transmission is thus reduced to 42.7% of the full aperture transmission. The shape of the corresponding Lyot stop is ob-

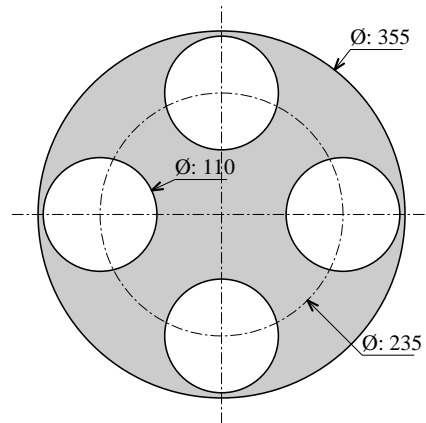


Fig. 4.— Entrance pupil geometry for the CORONA instrument. Dimensions are in millimeters.

tained from the geometry of the entrance pupil through: (i) a global scaling according to magnification factor of the optics, (ii) a reduction of 30% of the holes’ diameter to improve rejection. Note that the same kind of pupil modification was recently proposed by Serabyn et al. (2006) to ideally match the pupil geometry for the phase mask, and use an off-axis clear sub-pupil of the telescope combined with a performing adaptive optics.

3. The laboratory tests

To test the component optical assembly, the coronagraphic phase mask was first brought to Dome C and simply exposed to its temperatures in November 2004 without any visible alteration. Back in France, the component has been tested in laboratory.

3.1. Test with a single circular aperture

The purpose of this first set of tests was to commission the phase mask component itself. A HeNe laser source ($\lambda = 633$ nm) has been used together with a set of standard optical components so as to produce a clean converging beam similar to the one produced by the CORONA telescope (same numerical aperture). The shape of pupil used in this first set of validation experiments was a single circular aperture. The phase mask was settled in the focal plane and pupil images were recorded for a first visual qualitative check of the phase mask efficiency.

Figure 5 displays recorded pupil images compared to numerical simulations: there is a good qualitative agreement.

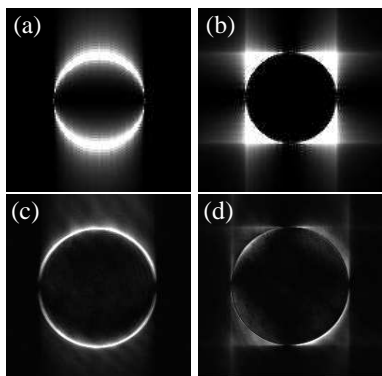


Fig. 5.— Coronagraphic images of the pupil plane (before the Lyot stop). Numerical simulations: (a) the star is centered on *one* phase knife, and (b) the star is centered at the intersection of the *two* phase knives. Laboratory images: (c) and (d) correspond to the conditions of (a) and (b) respectively.

For a more quantitative comparison, we measured the coronagraphic nulling performances. To achieve this goal, we added a Lyot stop in the re-

layed pupil plane, with a circular hole 30% smaller than the geometrical entrance pupil image.

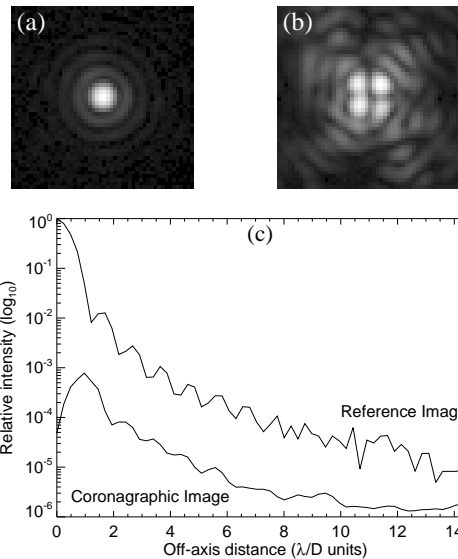


Fig. 6.— Laboratory experiment results obtained with a single circular entrance pupil: (a): Reference image, (b): Coronagraphic image (intensity $\times 1000$) and (c): average radial profiles (logarithmic scale for the intensity axis).

Figure 6 shows the reference (non coronagraphic) Point Spread Function (PSF), the coronagraphic residual PSF (intensity scale $\times 1000$), and their average radial profiles in logarithmic scale on the intensity axis. With this pupil configuration, the peak value for the coronagraphic extinction ratio¹ has been found better than 10^3 . The rejection rate (ratio of the transmitted energy with and without coronagraph) measured in the coronagraphic focal plane, reaches 700.

3.2. Test with four circular sub-apertures

To be closer to the actual geometry of the CORONA instrument, we have conducted a second set of laboratory experiments, similar to the one described in Sect. 3.1, but with a four-hole entrance pupil (see Fig. 7). The Lyot stop for this set of experiments has the same shape as the image of the entrance pupil, but with a 15% re-

¹Ratio of the maximum intensity in the images, without and with the coronagraph.

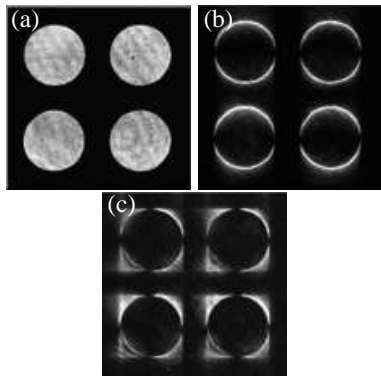


Fig. 7.— Laboratory pupil images. (a): with the source off-axis. (b): with the source centered on *one* phase knife. (c): with the source centered at the intersection of both phase knives (coronagraphic pupil image).

duction in the diameter of the four holes. The

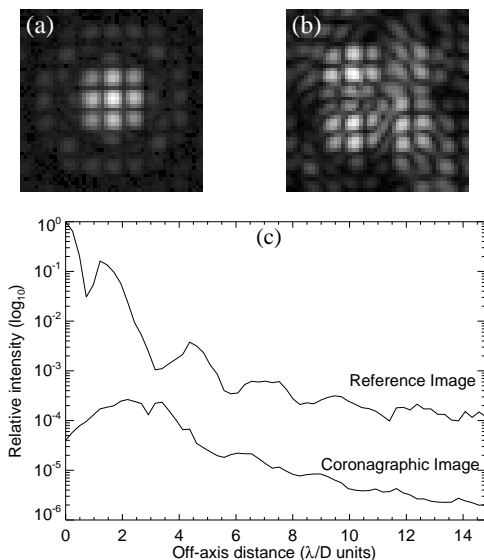


Fig. 8.— Laboratory experiment results obtained with the four sub-apertures pupil mask: (a): Reference image, (b): Coronagraphic image (intensity $\times 1000$) and (c): average radial profiles (logarithmic scale for the intensity axis).

results are summarized in Fig. 8, which displays the non-coronagraphic PSF (off-axis source), the coronagraphic residual PSF (on-axis source) with the intensity multiplied by 1000, and the average

radial intensity profile in logarithmic scale for the intensity axis. The extinction rate in the four-hole configuration reaches 650.

4. On-sky tests

CORONA's first light at Dome C was obtained on December 5th, 2005 at 11h local time (UTC+8h).



Fig. 9.— CORONA at Dome C in December 2005

4.1. Observing conditions and constraints

A good optical alignment is essential to obtain the best performances. Prior to on-sky tests, an optical bench was set up in the Concordia lab at the beginning of the summer campaign in November 2005. An artificial star was created using a pinhole lit by a laser at the focus of a 16-inches, Schmidt-Cassegrain telescope. The collimated output beam was sent to the C14 telescope of the CORONA instrument.

CORONA was installed near the two wooden platforms of the Concordia Observatory at 1.5m above the ground. These platforms are located 300m away from the Concordia station, in South-West direction to avoid the turbulence generated by the local power plant (Aristidi et al. 2005a). CORONA is operated from an igloo station located ten meters away from the telescope.

Polar alignment was made by the Bigourdan method on solar spots, and fine tuning was made on HD 45348 itself during the observations. The collimation of the telescope could not be performed perfectly, because of the high level of daytime sky background. Indeed, even with the brightest visible star (Canopus), the telescope

could not be sufficiently defocused without losing the star image.

A short exposure time (10 ms) was chosen in order to freeze the effects of both atmospheric turbulence and mechanical vibrations. No automatic star tracking device was available.

4.2. The stars

For this first daytime on-sky observation campaign, bright single and multiple stars have been chosen :

- HD 45348 (“ α Carinæ” or “Canopus”), a bright single star (spectral type F0, magnitude -0.72). This star has been used for polar alignments and optical fine tuning, since it is ten times brighter than the daytime sky background.
- HD 128620J (“ α Centauri”), a triple star system which faintest component (α Centauri C, or “Proxima Centauri”), has magnitude 11 which is too faint to be detected with our instrument. The A component has G2 spectral type. The magnitudes of the A and B components are -0.01 and 1.33, with an angular separation of 14.1″.
- HD 108248J (“ α Crux”), a double star with a smaller angular separation than α Centauri (4.4″) and magnitudes 1.4 and 1.8. The A component has B1 spectral type.

4.3. Data reduction

4.3.1. Data organization and particularities

Three different kinds of data sets have been taken: non coronagraphic (reference) sets, coronagraphic sets and sky background sets. Each set is a sequence of 374 snapshots. The size of each snapshot is 640×480 pixels.

For several reasons, the standard astronomical data reduction tools could not be used. Indeed, the images were recorded by daytime. Thus, the sky background is high and some faint but relevant structures (stellar companions or coronagraphic residues) hardly emerge out of the background noise. In addition, the background could not be fully compensated by simple sky image subtraction, since the sky brightness varies with time (coronagraphic and non-coronagraphic images could not be recorded simultaneously).

Moreover, the four-holes geometry of the entrance pupil leads to non axis-symmetric PSF, even for non-coronagraphic images. Thus, no gaussian profile could be fitted on the PSFs to compute Full Widths at Half-Maximum (FWHM), or photometric centers.

Moreover, the shadow of the four quadrant structure of the phase mask is visible on all images because of the high sky background level. This makes the image centering process more difficult.

As a consequence, special post-processing techniques had to be developed. We describe them in Sects. 4.3.2 to 4.3.5.

4.3.2. Image centering and resizing

The shadow of the phase knives edges is visible on most individual frames as a cross-shaped zone, slightly darker than the background (see for example Fig. 10). This feature has been used for a numerical centering procedure. Indeed, the reference point (intersection of the coronagraph axis with the CCD array) may slightly move around a mean position, due to mechanical flexions within the CORONA instrument itself. Furthermore, all the frames could be clipped to 256×256 pixels without any loss of relevant information. Indeed, the stars separation (for binaries) and the misalignments (for reference images) were small enough (a few arc seconds) to fit within a central square on the CCD array.

The following centering-clipping process is performed on each individual frame (sky, reference and coronagraphic images) :

– First, we start from a very raw estimate of the position of the reference point (the same for all frames in all data sets), and we extract a 256×256 sub-frame centered on this estimated position.

– For a better estimate of the reference point, we add up all the rows in this sub-frame (except a few ones near the center of the field, where stellar leakage may corrupt the profile). The resulting 1D intensity profile displays a localized depletion, near the center. After suitable filtering, the position of the minimum is accurately computed by a least square fit to a parabola. This serves as a better estimate for the X -coordinate of the reference point.

– The same is done with columns instead of rows. This yields a better estimate for the Y -coordinate

of the reference point.

- In the original 640×480 frame, a new 256×256 sub-frame is extracted, around the new estimated position of the reference point.
- This procedure can be iterated if an accuracy better than 0.02 pixel is needed. Otherwise, the *rms* error in the position of the reference point is close to 0.1 pixel.

This sequence of operations applied to all frames in a data set, leads to a new data set, where all the frames are centered and resized to ease further operations.

4.3.3. Photometry on non-coronagraphic images

Reference (non-coronagraphic) images have been recorded, with the star (and companion for binaries) clearly off-axis. To each individual centered and clipped reference image, the following processing steps were applied:

- The mean sky background is computed from the 374 centered and clipped sky images contained in the sky data set. This mean sky background image is subtracted to the individual reference images.
- The position of the main star is estimated by searching the brightest pixel in the whole frame. It is then possible to determine in which of the four quadrants of the phase mask the image of the star (and companion) is located.
- The mean background photometric level m and its standard deviation σ are computed on three 100×100 pixels zones, extracted from the three quadrants without any stellar image. These zones are chosen not to overlap the cross pattern (the shadow of the phase knives edges). The mean level m is not exactly zero although the mean sky background image has been subtracted. This is mainly due to slight time-variations of the brightness of the sky. This residual background is not negligible, and it must be taken into account.
- A photometric noise threshold T is computed as: $T = m + k * \sigma$, where k is a coefficient ranging from 2 to 3, which can be fine tuned for each data set.²
- A circular vicinity around the center of the main star is defined so as to encompass the PSF of the

main star, without overlapping the PSF of the companion (for binaries).

- The pixels in this vicinity, whose value exceeds the noise threshold T are selected, counted, and their photometric value is cumulated. This yields a raw estimate of the photometric flux.
- The raw estimate is corrected for the residual sky background: let us denote N the number of selected pixels. The final estimate of the stellar photometric flux is simply obtained from the raw photometric flux by subtracting N times the mean photometric background level m .
- For binary stars, the photometric flux of the companion also has to be estimated. To do so, the pixels in the circular vicinity of the main star are set to zero, and the algorithm just described is applied once more.

An individual image is rejected if the number of the selected pixels is too low. The mean reference (non-coronagraphic) fluxes $I_{ref}^{(s)}$ and $I_{ref}^{(c)}$ for the main star and its companion respectively, are determined by averaging the photometric fluxes computed for the whole set of retained individual images.

4.3.4. Photometry on coronagraphic images

The steps are almost the same as those described in Sect. 4.3.3. The first difference is that the companion is brighter than the coronagraphic residual image of the main star. Thus, the brightest pixel detection step locks on the companion first. The second difference is that the position of the main star is known: it is close to the coronagraphic reference point, which is at the very center of the frame, since the latter has previously been centered (see Sect. 4.3.2).

For each coronagraphic image, we thus obtain the coronagraphic residual fluxes, respectively called $I_{cor}^{(s)}$ for the star and $I_{cor}^{(c)}$ for its companion (or simply I_{cor} for single stars).

4.3.5. Rejection rate estimate

The rejection rate R is defined as follows:

$$R = \frac{I_{nc}}{I_{cor}},$$

where I_{cor} is the residual coronagraphic photometric flux of the star, and where I_{nc} is the photomet-

²A more sophisticated method to estimate the photometric noise threshold from a histogram has also been tested. It led to similar results.

ric flux the star would have *at the same instant*, if shifted off-axis.

The non-coronagraphic reference set and the coronagraphic data set could not be recorded simultaneously as opposed in the original concept (Abe et al. 2007). This limitation is addressed in Sect. 6. Hence, a lack of accuracy in the computation of the rejection rate may result from the time-variations of the transparency of the sky. For a single star like Canopus, it cannot be compensated: the best estimate for the instantaneous non coronagraphic brightness I_{nc} is the reference brightness I_{ref} , measured a few minutes before. For binary stars however, the brightness of the companion keeps track of these possible variations of the transparency of the sky, assuming the image of the companion is far enough from the coronagraphic axis in both the reference and coronagraphic images. If the companion emerges sufficiently clearly from the background noise, the instantaneous non coronagraphic brightness $I_{nc}^{(s)}$ can be estimated from the reference brightness $I_{ref}^{(s)}$ as follows:

$$I_{nc}^{(s)} = I_{ref}^{(s)} \times \frac{I_{nc}^{(c)}}{I_{ref}^{(c)}}.$$

4.4. The results

Table 4.4 sums up the statistics of the measured coronagraphic performances for the first daytime observation campaign at Dome C. For HD 45 348 and HD 128 620J, the rejection value reaches 32. For HD 108 248J the best rejection value is almost 18. Very few snapshots have a rejection rate over 20; rejection rates over 30 are rather exceptional. However, the great number of snapshot with a rejection rate over 10 is very encouraging for daytime observations.

Figure 10 displays the best snapshots for these objects, together with individual non-coronagraphic images for visual comparison. Coronagraphic long exposure images are obtained by averaging the best selected snapshots. As an example, Fig. 11-(a) shows a 3D intensity plot for the coronagraphic long exposure of HD 45 348 obtained with data recorded on the 11 December 2005: the 743 snapshots with rejection rate better than 10 have been averaged. For visual comparison, a long exposure non-coronagraphic image of this object is shown in Fig. 11-(b). It has been

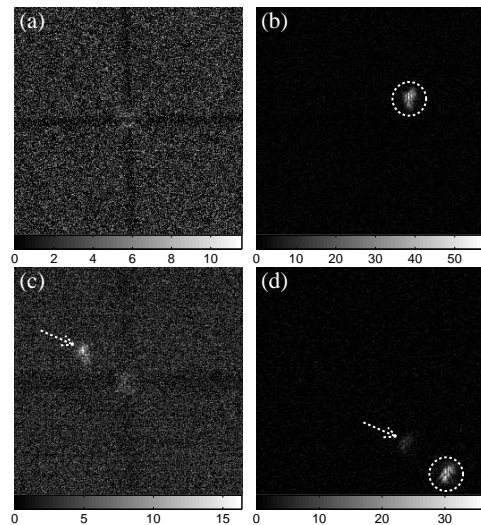


Fig. 10.— Best attenuated coronagraphic images: (a) for HD 45 348 and (c) for HD 128 620J. For visual comparison, individual non-coronagraphic images of these two objects are also shown: (b) for HD 45 348 and (d) for HD 128 620J. The dashed circles show, on frames (b) and (d), the stars which are on-axis on frames (a) and (c). The dashed arrows on frames (c) and (d) show the companion.

obtained by averaging a complete data set of reference images (374 snapshots). Figure 12-(a) dis-

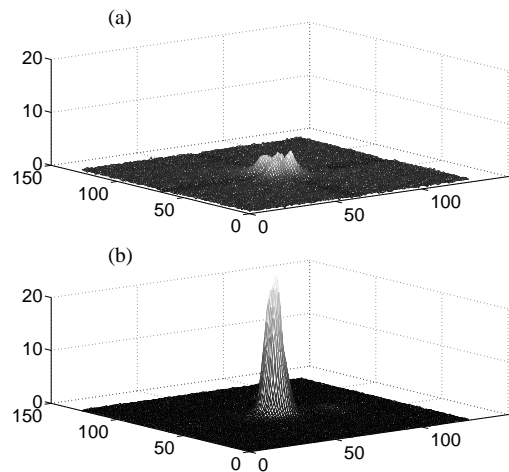


Fig. 11.— 3D intensity plots for long exposures of HD 45 348: (a) Coronagraphic image, (b) Non-coronagraphic image.

TABLE 1

Summary of the results of CORONA's first daytime observation campaign at Dome C (December 2005). s is the median seeing. n is the total number of coronagraphic frames available. $n_{>10}$, $n_{>20}$ and $n_{>30}$ are the number of frames with rejection greater than 10, 20 and 30 respectively. R_{max} is the maximal rejection value.

Date	Object	s	n	$n_{>10}$	$n_{>20}$	$n_{>30}$	R_{max}
5 Dec. 2005	HD 45 348	0.7''	1122	0	0	0	9
8 Dec. 2005	HD 128 620J	0.7''	3740	141	16	3	32
9 Dec. 2005	HD 45 348	0.7''	1870	13	0	0	14
11 Dec. 2005	HD 128 620J	0.6''	2992	881	84	4	32
11 Dec. 2005	HD 45 348	0.8''	4488	743	13	1	32
12 Dec. 2005	HD 108 248J	0.5''	2244	228	0	0	18
13 Dec. 2005	HD 45 348	0.6''	748	0	0	0	9

plays the coronagraphic long exposure image for HD 128 620J: it is the average of the 881 snapshots with rejection rate better than 10 (data recorded on the 11 December 2005). As for HD 45 348, the non-coronagraphic long exposure image shown in Figure 12-(b) is the average of a whole reference data set.

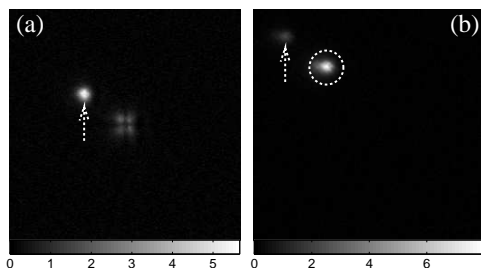


Fig. 12.— Long exposures of HD 128 620J: (a) Coronagraphic image, (b) Non-coronagraphic image. The dashed circle shows, on frame (b), the star which is on-axis on frame (a). The dashed arrows show the companion. Note that the photometric scales are different on both frames.

5. Discussion

Several facts have to be taken into account to correctly interpret the meaning of the observation results reported in Sect. 4.4:

The images were recorded by daytime, with a bright sky background. Some of the best coron-

agraphic images, without enough pixels emerging out of the noise, had thus to be removed. Indeed, no measurable residual signal could be extracted from them. As a consequence, the claimed value of 32 for the rejection ratio is only a lower bound, mostly limited by the sky background noise level and not by the coronagraph itself. This problem should not occur with night observations.

The coronagraphic phase mask is not perfectly achromatic. The phase shift departs from its ideal value π , especially below 400 nm. Taking into account the actual sensitivity of the science camera and the estimated transmission of the optical train, the broadband rejection rate is not expected better than 67 for a solar-type source. However, this expected rejection rate would theoretically rise above 2000 if an UV-rejecting filter removing radiations with wavelengths smaller than 420 nm is added.

Stellar coronagraphs with good close sensing capabilities are extremely sensitive to the tip-tilt component of the atmospheric turbulence and to tracking defects. Neither adaptive optics nor tip-tilt corrector, nor auto-tracking facility were available on CORONA. This hampered severely the expected performances.

The coronagraphic bench has to be perfectly aligned in a laboratory before being operated on the sky. This operation could not be done perfectly during this first observation campaign, since the Concordia optical laboratory bench was not fully available yet.

Even with good seeing conditions, the CORONA instrument is not diffraction limited. Aberrations appear in the telescope and their origin needs to be investigated.

6. Conclusion

We have presented the first light results from the Dome C Concordia station (Antarctica) for an achromatic phase knife coronagraph. It should be underlined that this also represents the first results for a stellar coronagraph in Antarctica. The rejection ratio of 32 measured by daytime over a relatively broad spectral band (360 nm to 640 nm FWHM) is very encouraging albeit modest. In addition, these first on-sky tests led to some important technical feedbacks that will benefit the future Dome C instruments.

During the winter, temperatures can drop down to values as low as -80°C in the night. Although the telescope is mechanically designed to work at low temperatures, the optics suffer in this extreme environment. CORONA was tested during the 2006 winterover, at a temperature of -65°C . Images of the target star Sirius showed strong aberrations with a triangular shaped PSF whose FWHM was around $15''$. These aberrations are probably caused by thermally induced mechanical tensions on the telescope mirrors. The coronagraph was not operational under these conditions.

CORONA has been sent back to Nice to receive several improvements. Some obvious limitations underlined by the first Antarctica observation campaign could thus be overcome:

- The primary mirror mounting mechanical design should be improved to withstand polar winter temperatures without excessive flexions and misalignments.
- An automatic star tracking system should be added, using the monitoring camera data to compensate for slow drifts.
- The coronagraphic performances would benefit from the installation of a residual tip-tilt corrector.
- An image-selection algorithm should be implemented, using the monitoring camera images, as described in Abe et al. (2007).
- An UV-rejecting filter should be inserted, to improve the coronagraph efficiency (see Sect. 5).
- The coronagraph should be combined with a

high speed, high efficiency photon counting camera that we are currently developing.

These validation observations are mostly important for the future development of ambitious astronomical long term programs at Dome C. These programs will include both high spatial resolution and high contrast instruments such as coronagraphs and nulling interferometers.

On one hand, daytime site-seeing monitoring (Aristidi et al. 2005b) has proved Dome C to offer exceptional atmospheric conditions during the polar summer: a Fried parameter close to 1 m was recorded, which corresponds to a $0.1''$ resolution at visible wavelengths. On the other hand, the extremely low atmospheric water content at Dome C (the average precipitable water vapor measured in summer at Dome C by Valenziano (2005) is 0.6 mm) is far from being equalled by any known observatory such as Mauna Kea or Paranal. Hence, any 10 m class monolithic telescope at Dome C, run with a focal coronagraph placed behind an extreme adaptive optics system, would definitely outperform any ground based ELT whatever its adaptive optics system is. It would also probably be competitive with space-borne missions for exoplanet detection such as JWST or TPF-C (Ford et al. 2005) and would be much cheaper. Besides, such a telescope could benefit from enhanced duty-cycle observations and even continuous exposures of several 24h periods to image circumpolar objects: the magnitude limitation of 30 mag objects which have been observed by the ultra-deep field observations of HST (Beckwith et al. 2006) could probably be exceeded.

Furthermore, it should be noted that the ground turbulence generated by a few dozen meter layer which has been measured during the Dome C winterover campaigns (Agabi et al. 2006), could be efficiently corrected by a simple Ground-Layer oriented Adaptive Optics (GLAO) system. In this case, high dynamic imaging with a large field of view like massive parallel coronagraphy, using fiber optics (Guyon et al. 2006) for instance, could be considered.

These perspectives therefore justify to progressively improve the CORONA pilot experiment (Tip-Tilt correction, low order adaptive optics system) reported in the present paper. The immediate purpose is to install our APKC instrument on the IRAIT 80 cm telescope (Tosti et al. 2006)

planned to be soon operated at Dome C in 2008-2009.

The authors would like to thank G. Greiss (SEOP, France) for manufacturing the achromatic phase mask, F. Valbousquet (Optique et Vision, France) for preparing the telescope, A. Robini (LUAN) who manufactured the mechanical parts of the coronagraphic bench, and F. Jeanneaux, C. Combier and K. Agabi for their help. The authors are also grateful to the staff of the summer campaign at Concordia for their help, and to the polar institutes IPEV and PNRA for the whole logistic support and the transport. The experiments reported in this article has been supported by the district of Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). G. Guerri is grateful to CNRS and the PACA district for supporting her PhD thesis. L. Abe is supported by Grants-in-Aid (No. 160871018002) from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.

REFERENCES

- Abe, L., 2002, PhD Thesis, (<http://www-astro.unice.fr/~abe/>, Publications section)
- Abe, L. et al. 2007, *A&A*, 461, 365
- Abe, L., Boccaletti, A., & Vakili, F. 2001, *A&A*, 374, 1161
- Abe, L., Domiciano de Souza Jr, A., Vakili, F. & Gay, J. 2003, *A&A*, 400, 385
- Agabi, A. et al. 2006, *PASP*, 118, 344
- Aime, C. & Soummer, R. 2004, *ApJ*, 612, L85
- Aime, C., Soummer, R. & Ferrari, A. 2002, *A&A*, 389, 334
- Aristidi, E. et al. 2005a, *A&A*, 430, 739
- Aristidi, E. et al. 2005b, *A&A*, 444, 651
- Aristidi, E. et al. 2003, *A&A*, 406, L19
- Beckwith, S. et al. 2006, *AJ*, 132, 1729
- Ford, V. et al. 2005, in *Proc. IAUC200*, Cambridge University Press, 335
- Gay, J., Rabbia, Y. 1997, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II*, 332, 265
- Guerri, G. et al. 2005, in *Proc. SF2A*, EDP Science Conf. Ser., 277
- Guerri, G. et al. 2006, *Proc. SPIE*, 6269, 62695D
- Guyon, O., Pluzhnik, E. A., Kuchner, M. J., Collins, B., Ridgway, S. T. 2006, *ApJS*, 167, 81
- Lloyd, J. P. et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4860, 171
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Mawet, D. et al. 2006, *A&A*, 448, 801
- Neuhaüser, R., Mugrauer, M., Fukagawa, M., Torres, G. & Schmidt, T. 2007, *A&A*, 462, 777
- Riaud, P., Boccaletti, A., Rouan, D., Lemarquais, F. & Labeyrie, A. 2001, *PASP*, 113, 1145
- Roddier, F. & Roddier, C. 1997, *PASP*, 109, 815
- Rouan, D., Riaud, P., Boccaletti, A., Clénet, Y. & Labeyrie, A. 2000, *PASP*, 112, 1479
- Serabyn, E. et al. 2006, *Proc. SPIE*, 6272, 62722W
- Soummer, R., Aime, C. and Falloon, P. 2003, *A&A*, 397, 1161
- Tosti, G. et al. 2006, *Proc. SPIE*, 6267, 62671H
- Valenziano, L. 2005, *EAS Pub. Series* 14, 25

This 2-column preprint was prepared with the AAS L^AT_EX macros v5.2.

Conclusion et perspectives de ce travail de thèse

Puisque le soleil est une étoile comme les autres, il est naturel de se demander si ces dernières sont entourées d'un cortège planétaire comme l'est notre astre de jour. En plus de lever le doute sur la véritable existence de ces exoplanètes par des techniques d'observation indiscutables, il est aussi excitant de savoir si une quelconque forme de vie peut s'y développer. Ceci passe donc, après la caractérisation spectroscopique de la planète extrasolaire une fois qu'elle a été détectée, par la recherche de bio-traceurs (Léger et al., 1999 [68]).

Grâce en partie aux nombreux développements technologiques de notre époque, il sera possible dans les prochaines décennies de commencer à donner une réponse scientifique à ces questions qui se posent aussi de manière philosophique. Une réponse instrumentale possible, de plus en plus étudiée aujourd'hui, est d'effectuer de l'imagerie à très haute dynamique par optique adaptative et coronagraphie.

Les travaux effectués dans ce mémoire de thèse constituent une contribution concrète allant dans ce sens puisque j'ai été amenée à étudier numériquement et expérimentalement deux systèmes coronagraphiques prometteurs, un coronographe de Lyot apodisé et un coronographe à couteaux de phase achromatique. Ces derniers se situent respectivement dans deux contextes totalement différents, l'un des meilleurs sites astronomiques au monde, le mont Paranal au Chili et ses quatre télescopes de 8m du VLT pour le premier, et un site astronomique en devenir encore en cours de qualification et d'aménagement, le site aux conditions quasi-spatiales du Dôme C en Antarctique pour le second.

Durant ma thèse, j'ai pu appréhender que les besoins de l'astronomie moderne en terme de grande résolution angulaire et très haute dynamique nécessitent d'importants efforts instrumentaux amenant à effectuer de la R&D poussée à la pointe de la technologie actuelle et ce, dans différents domaines. Ceci constitue un défi extraordinaire pour l'ingénieur de formation que je suis.

Un des défis majeurs actuel est, dans le contexte des futurs grands projets instrumentaux, l'importance de garantir des performances élevées tout en maintenant un niveau de complexité acceptable. Ceci implique la nécessité de faire des compromis parmi toutes les spécifications et d'effectuer rapidement, si cela est possible, des tests de prototypes afin de relaxer ou non certaines contraintes.

De plus, en bénéficiant des larges progrès effectués dans le domaine des moyens de calcul informatique, il est désormais possible de réaliser une simulation réaliste end-to-end d'un instrument permettant ainsi de contraindre au mieux tous les paramètres d'un premier prototype de laboratoire puis de l'instrument final lui-même.

L'imagerie à très haute dynamique nécessite à mon sens une réflexion générale qui englobe dans son ensemble tous les problèmes instrumentaux allant du miroir primaire du télescope jusqu'au détecteur ainsi qu'une synergie constante entre techniciens, ingénieurs, astrophysiciens théoriciens et observateurs.

En outre, dans l'état actuel de la technologie, il semble que le couple optique adaptative/coronagraphie est encore confronté à des limitations diverses interdisant l'accès à l'imagerie systématique de planètes extra-solaires (même si cinq planètes viennent d'être imagées) et ce, même après calibration et application d'algorithmes de post-traitements des images enregistrées. Une des limitations majeures est issue des problèmes liés à la turbulence atmosphérique qui nécessitent la réalisation de systèmes d'optique adaptative extrême qui sont encore en cours de développement. Dans ce sens, l'espace semble être le cadre de développement le plus adapté pour les futurs imageurs à fort contraste. Cependant, des inconnues technologiques existent et nécessitent d'être préalablement validées au sol.

Dans ce contexte, le site du Dôme C en Antarctique me paraît être une bonne transition entre le sol et l'espace, à la fois pour effectuer des tests de futurs instruments spatiaux mais aussi pour

explorer de nouveaux domaines astrophysiques peu exploités et, qui sait, pour réaliser l'image de la première exo-Terre (Vakili et al., 2004 [104]). En effet, l'implantation d'un instrument sur un site ayant un meilleur seeing que les sites astronomiques classiques permet d'obtenir, à concept instrumental identique, des performances supérieures car on pourrait idéalement obtenir un gain cumulé sur la transparence (spectrale), l'aire et le temps de cohérence et enfin le domaine d'isoplanétisme (ou isopistonique, Elhalkouj et al., 2008 [42]). Dans cette optique, le travail fourni sur le développement et l'exploitation de la première lumière de l'instrument CORONA, le premier prototype de coronographe stellaire au Dôme C, n'a certes pas pu se concrétiser sur des résultats astrophysiques tangibles mais il a apporté des enseignements que je pense importants pour l'avenir, à la fois au niveau de la conception instrumentale qu'à celui de la réduction de données.

D'une manière générale, il m'a été possible, au travers du travail que j'ai fourni, de définir une méthodologie numérique et de laboratoire applicable à divers systèmes coronographiques. Le travail présenté dans cette thèse pourra être appliqué au développement des futurs grands instruments tels que SEE-COAST, projet de télescope spatial hors-axe visible et proche-infrarouge équipé d'un système coronographique ou EPICS, le futur instrument imageur d'exoplanètes pour l'E-ELT (42m de diamètre) qui comprendra lui aussi un coronographe.

Dès le début des années 2010, les premières lumières des instruments SPHERE sur le VLT et GPI sur Gemini vont ouvrir la voie à l'imagerie d'exoplanètes de type Jupiters chauds. Il faudra attendre quelques années de plus pour avoir la possibilité d'imager une exo-terre vraisemblablement avec les ELT au sol ou les missions spatiales Darwin ou TPF-C par exemple. Par ailleurs, l'aboutissement des recherches en imagerie à très haute dynamique et à haute résolution angulaire va engendrer une multiplication considérable des thèmes astrophysiques, l'approfondissement ainsi que la validation d'un grand nombre de théories qui n'ont pas pu être confrontées pour l'instant à des observations.

Annexes

Annexe A

Liste des publications

Publications dans les journaux à comité de lecture

Guerri, G., Robbe-Dubois, S., Daban, J.-B., Douet, R., Abe, L., Bendjoya, P., Carbillet, M., Vakili, F., Baudrand, J., Riaud, P., Boccaletti, A., Beuzit, J.-L., Puget, P., Dohlen, K.
Apodized Lyot Coronagraph for VLT-SPHERE : II. Laboratory tests and performances of a first prototype in the near-infrared
A&A, 2008, en préparation

Carbillet, M., Bendjoya, P., **Guerri, G.**, Abe, L., Ferrari, A., Boccaletti, A.
Apodized Lyot Coronagraph for VLT-SPHERE : I. Preliminary numerical studies
A&A, 2008, en préparation

Guerri, G., Abe, L., Daban, J.-B., Aristidi, E., Bendjoya, P., Rivet, J.-P., Vakili, F.
First Light from the Dome C (Antarctica) of a phase knife stellar coronagraph
PASP, 2008, Soumis

Conférences

Guerri, G., Robbe-Dubois, S., Daban, J.-B., Abe, L., Douet, R., Bendjoya, P., Vakili, F., Carbillet, M.
Apodized Lyot coronagraph for the VLT instrument SPHERE : laboratory tests and performances of a first prototype in the visible
Proc SPIE, 2008

Boccaletti, A., Abe, L., Baudrand, J., Daban, J.-B., Douet, R., **Guerri, G.**, Robbe-Dubois, S., Dohlen, K. and Mawet, D.
Prototyping coronagraphs for exoplanet characterization with SPHERE
Proc SPIE, 2008

Fossat, E., Vakili, F., Aristidi, E., Lopez, B., Schmider, F.-X., Agabi, K., Daban, J.-B., Al-louche, F., Belu, A., Gori, P.-M., **Guerri, G.**, Valat, B.
Multi-aperture interferometry at Concordia
Highlights for Astronomy, Volume 14, Issue 14, p. 705-706, 2007
Proc. of the International Astronomical Union, 2006

Guerri, G., Abe, L., Aristidi, E., Daban, J. B., Rivet, J. P., Bendjoya, P., Vakili, F., Agabi, A.
CORONA : First Light at Dome C of the Antarctica Prototype APKC Coronagraph
EAS Publications Series, Volume 25, pp.339-342, 2007
Proc. First ARENA Conference, 2006

Guerri, G., Daban, J. B., Vakili, F., Abe, L., Aristidi, E., Agabi, K., Bendjoya, P., Sarry, J.,
Schmider, F. X., Lopez, B.
CORONA : progress report on the Dome C prototype APKC coronagraph
Proc. SPIE, Volume 6269, pp. 62695D, 2006

Guerri, G., Daban, J. B., Abe, L., Bendjoya, P., Vakili, F., Sarry, J., Auroux, S.
High dynamic range imaging test-bed at LUAN : Works and future prospects
Proc. SF2A 2005, p. 277, 2005

Abe, L., Belu, A., Daban, J.-B., Vakili, F., Caratti, C., Filloux, C., Rous, G., Rivassou, F.,
Guerri, G.
TIRAN : Testbed for interferometric Remapped Array Nuller
Proc. SPIE, Volume 5491, p. 1771, 2004

Annexe B

Article portant sur le travail
expérimental de caractérisation du
premier prototype d'ALC $3\lambda/D$ visible
paru dans SPIE

Apodized Lyot Coronagraph for VLT-SPHERE : Laboratory tests and performances of a first prototype in the visible

Géraldine Guerri^a, Sylvie Robbe-Dubois^a, Jean-Baptiste Daban^a, Lyu Abe^a, Richard Douet^a,
Philippe Bendjoya^a, Farrokh Vakili^a, Marcel Carbillet^a, Jean-Luc Beuzit^b, Pascal Puget^b,
Kjetil Dohlen^c and David Mouillet^b

^aLaboratoire A.H. Fizeau, UMR-CNRS 6525, Université de Nice Sophia-Antipolis,
Observatoire de la Côte d'Azur, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2, France

^bLaboratoire d'Astrophysique Observatoire de Grenoble (LAOG), UMR-CNRS 5571,
Université J. Fourier, 414, rue de la piscine, 38041 Grenoble cedex 9, France

^cLaboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), Observatoire Astronomique de Marseille
Provence, 2, place Le Verrier, 13248 Marseille cedex 4, France

ABSTRACT

We present some of the High Dynamic Range Imaging activities developed around the coronagraphic test-bench of the Laboratoire A. H. Fizeau (Nice). They concern research and development of an Apodized Lyot Coronagraph (ALC) for the VLT-SPHERE instrument and experimental results from our testbed working in the visible domain.

We determined by numerical simulations the specifications of the apodizing filter and searched the best technological process to manufacture it. We present the results of the experimental tests on the first apodizer prototype in the visible and the resulting ALC nulling performances.

The tests concern particularly the apodizer characterization (average transmission radial profile, global reflectivity and transmittivity in the visible), ALC nulling performances compared with expectations, sensitivity of the ALC performances to misalignments of its components.

Keywords: High contrast imaging, Astronomical Instrumentation : Coronagraphy

1. INTRODUCTION

Since 1995 and the discovery of the first extrasolar planet by M. Mayor and D. Queloz (1995¹¹), direct detection and spectral characterization of an exoplanet has become one of the most exciting and challenging astronomical areas. In this context, European Southern Observatory (ESO) supported two phase A studies for a "planet finder" instrument for its second-generation instruments on the Very Large Telescope (VLT). After the review of these two studies, an unique instrument called SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) is now considered for a first light in 2010.

SPHERE (Beuzit et al. 2006²) is a second generation instrument for the VLT designed and built by a consortium of French, German, Italian, Swiss and Dutch institutes in collaboration with ESO. The project is currently in its phase B. The main goal of SPHERE is the direct detection of faint objects very close to a bright star, especially giant extrasolar planets. Other science studies concern brown dwarfs, circumstellar disks and related phenomena such as mass loss mechanisms, stellar winds or planetary nebulae. The design of the SPHERE instrument is divided into four subsystems : the Common Path Optics and three science channels, a differential imaging camera (IRDIS), an Integral Field Spectrograph (IFS), and a visible imaging polarimeter (ZIMPOL).

In the consortium, we are in charge of the study and the development of an Apodized Lyot Coronagraph (ALC). In the instrument design, the ALC will be a part of the Common Path Optics subsystem of SPHERE.

Further author information: Send correspondence to G. Guerri, guerri@unice.fr, Telephone: +33 (0)4 92 07 65 73

The purpose of this paper is twofold. After having briefly recalled the principle of the Apodized Lyot Coronagraph in section 2, we describe in section 3 the experimental setup of the high dynamics range imaging coronagraphic testbed and the detailed characteristics of the three main components of the ALC tested prototype (apodizer, coronagraphic mask and Lyot stop). Then, we present the laboratory tests of the ALC prototype in the visible. They concern measurements of the apodizer transmission profile (section 4) and of the ALC coronagraphic performances (section 5) and the study of the ALC sensitivity to lateral and longitudinal misalignment of its components (section 6).

Although SPHERE will operate in the near-IR domain, these visible measurements allowed to validate the principle and the manufacturing technique of the apodizer. It gave preliminary estimations of the coronagraph performance. Furthermore, a visible optical bench is easier to set-up than a near IR cold bench.

2. PRINCIPLE OF THE APODIZED LYOT CORONAGRAPH

2.1 Preliminary

Firstly, Bernard Lyot introduced in 1930 the principle of the Classical Lyot Coronagraph (Lyot, 1930¹⁰) : an occulting disk, the Lyot coronagraphic mask, is placed in the telescope focal plane so as to block the central part of the Airy pattern of the star. In the relayed pupil plane, a diaphragm called Lyot stop is placed in order to remove the light rejected by the coronagraphic mask out of the geometrical image of the pupil. The smaller the size of this Lyot stop is, the better the light attenuation is, but also the lower the throughput is. Unfortunately, the contrast achieved by the Classical Lyot Coronagraph is not sufficient enough to image an exoplanet.

2.2 Principle

In this context, Aime, Soummer et al. (2002¹, 2003¹²) proposed a dramatic improvement with the principle of the Prolate Apodized Lyot Coronagraph. In Fig. 1, we present the principle of the Apodized Lyot Coronagraph (ALC) adapted to our study, ie the ALC designed for SPHERE.

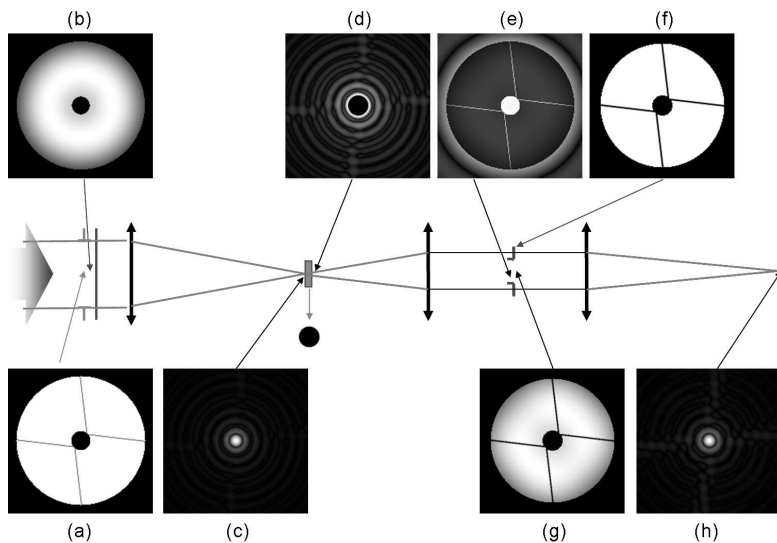


FIG. 1. Principle of SPHERE Apodized Lyot Coronagraph : (a) Entrance pupil, (b) Apodizer, (c) Point spread function (PSF) at the focus of the telescope, (d) PSF when the Lyot occulting coronagraphic mask is settled, (e) Pupil image before the Lyot stop introduction, (f) Lyot stop, (g) Pupil image with the Lyot stop, (h) Final coronagraphic PSF

In this figure, we can see that, because the VLT entrance pupil is not a simple circular aperture and has a central obscuration and 4 spiders, the apodizer transmission function has a bagel shape (Soummer 2005¹³, Carbillet et al. in prep.⁵). Furthermore, the best coronagraphic performance is obtained when the Lyot stop has the same shape as the entrance pupil one.

2.3 Overview of apodizer manufacturing techniques

Apodizing masks are commonly used in optics for 20 years for instance for laser beam shaping. However, the shape of the transmission profiles and the tolerance bounds are totally different and less constraining than those needed to perform astronomical high dynamic range imaging. That's why, one of the ALC critical realization point is the manufacturing of the apodizer. Several worldwide institutes are currently testing various apodization techniques : we can cite for instance thin layer deposition, ion implantation, HEBSTM glass (Soummer et al. 2006¹⁴) or use of a Mach-Zehnder interferometer (Carlotti et al. 2007⁶). The main challenge is to obtain an apodizer that meets as much as possible the strong specifications and who introduces the lowest wavefront errors.

3. EXPERIMENTAL SETUP OF THE CORONAGRAPHIC BENCH

3.1 The coronagraphic bench

Figure 2 shows the visible optical setup of the high dynamics range imaging bench developed by the Fizeau laboratory. The characteristics of each optical element are given in table 1.

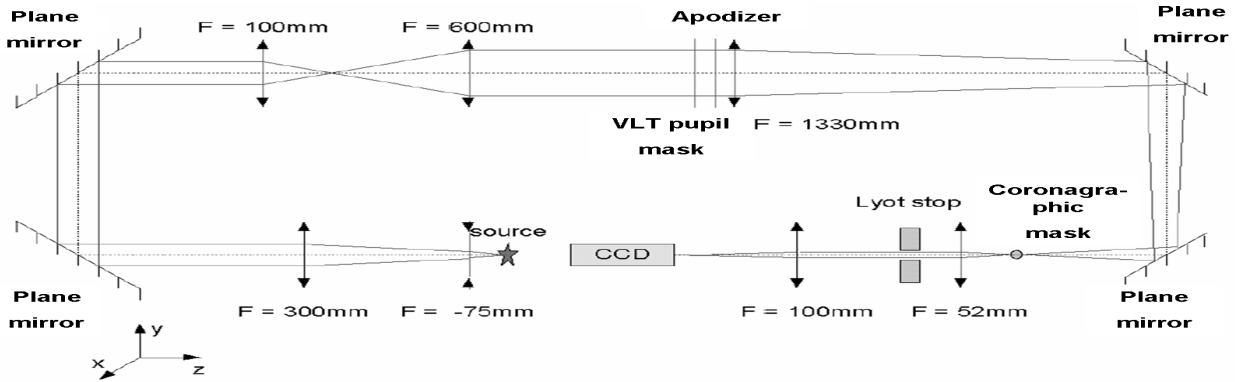


FIG. 2. Optical setup of Fizeau laboratory high dynamics range imaging bench.

Several light sources are available :

- a HeNe-laser Melles Griot 25 LHR 691-230 : $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, output power 2.5mW for alignment purpose.
- a fibered laser diode Melles Griot 57PNL062/P4 : $\lambda = 635 \text{ nm} \pm 15$, output power 7mW, polarization-maintaining singlemode fiber, for monochromatic performance (less coherent than the laser).
- a white light source with an output power of 5mW for chromatic measurements.

The lenses L_1 , L_2 , L_3 et L_4 form two successive afocal systems that collimate the beam in order to obtain a parallel beam behind the lens L_4 . The diameter of the beam is here 28 mm , equal to the apodizer one. This resulting beam was thereby magnified by a factor of 24 compared to the initial beam so as to keep the central part of the gaussian wavefront delivered by the fibered source and therefore to obtain an uniform intensity distribution in the pupil plane. Nevertheless the size of the useful part remains 28 mm . Then comes the so called coronagraphic chain whose components will be described below. It should be noted that the four plane mirrors have the unique fonction to fold up the beam in the available location. The detector is a CCD array Adimec-1000M. The main characteristics of this detector are : array of 1004×1004 pixels ($7.4 \mu\text{m}$ each), 10 bits dynamics, 16 e⁻ read-out noise.

3.2 Characteristics of the ALC components

3.2.1 The pupil mask

The pupil mask reproduces the VLT entrance pupil as shown on figure 3. It was manufactured by the company Micromodule (Brest, France) by a Chromium deposition on a BK7 substrate. The mask is 100% transmissive on a 28 mm -diameter disk called outer diameter. The mask blocks the light on a concentric central disk that simulates the telescope central obscuration (its 4.2 mm diameter corresponds to 15% of the outer diameter).

Component	Characteristics
Fibered laser diode	$\lambda = 635 \text{ nm}$, $P = 7 \text{ mW}$
Diverging lens L_1	$f_1 = -75 \text{ mm}$
Converging lens L_2	$f_2 = +300 \text{ mm}$
Plane mirrors M_1 and M_2	optical quality $\lambda/5$ at 633nm
Converging lens L_3	$f_3 = +100 \text{ mm}$
Converging lens L_4	$f_4 = +600 \text{ mm}$
Pupil mask	see Fig 3 and Sect. 3.2.1
Apodizer	see Fig 4 and Sect. 3.2.2
Converging lens L_5 (achromat)	$f_5 = +1330 \text{ mm}$
Miroirs plans M_3 and M_4	optical quality $\lambda/5$ at 633nm
Lyot coronagraphic mask	$\Phi = 90 \mu\text{m}$ see Sect. 3.2.3
Converging relay lens L_6 (achromat)	$f_6 = +52 \text{ mm}$
Lyot stop	see Sect. 3.2.4
Imaging converging lens L_7 (achromat)	$f_7 = +100 \text{ mm}$
Science camera	CCD Adimec

TAB. 1. Inventory of the Fizeau laboratory high dynamics range imaging bench components.

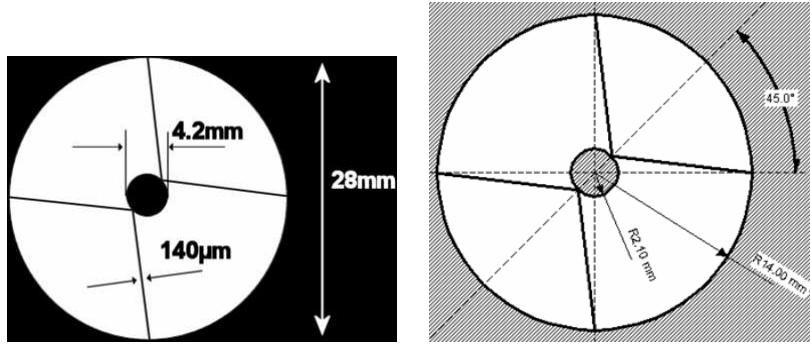


FIG. 3. Shape and dimensions of the pupil mask reproducing the VLT entrance pupil.

Four rectilinear arms simulate the telescope spiders, $140 \mu\text{m}$ -width each. They join the four cardinal points of the outer diameter to the central obscuration in 2 fastening points. Table 2 gives the technical specifications of the pupil mask.

Parameter	Specification
Outer diameter	$28.00 \pm 0.05 \text{ mm}$
Central obscuration diameter	$4.20 \pm 0.05 \text{ mm}$
Spiders width	$0.140 \pm 0.01 \text{ mm}$
Mask optical density	$10^6 \pm 10^{0.5}$
Substrate	BK7
Substrate thickness	1.5 mm
Substrate optical quality	$\lambda/4$ PTV at $\lambda = 633 \text{ nm}$ on the front face
Substrate parallelism	$\leq 1'$
Antireflection coating	on the back face ($<0.5\%$)

TAB. 2. Technical specifications of the pupil mask.

3.2.2 The apodizer

The apodizer was manufactured by the company Reynard Corporation according to the metallic thin layer evaporation technique of Inconel 600TM on a BK7 substrate. Its transmission profile was optimized by numerical simulations to fit with a Lyot coronagraphic mask with an angular diameter of $3\lambda/D$. Table 3 gives the technical specifications for the apodizer that were required to the manufacturer.

Characteristics	Specification
Outer diameter of the apodized area	28.00 mm
Outer diameter of the substrate	40.00 mm
Substrate thickness	2 mm
Surface quality of the substrate (scratch - dig)	5 - 10
Optical surface quality	$\lambda/10$ PTV at 632.8 nm
Parallelism	$\leq 1'$
Substrate material	BK7
Coated metal	Inconel
Tolerance on the profile	$\pm 5\%$
Coating	Anti-reflection coating on the 2 faces

TAB. 3. Manufacturing specifications for the apodizer $3\lambda/D$ in the visible.

Figure 4 shows the theoretical optimal average radial profile in transmission of the apodizer. This profile, noted

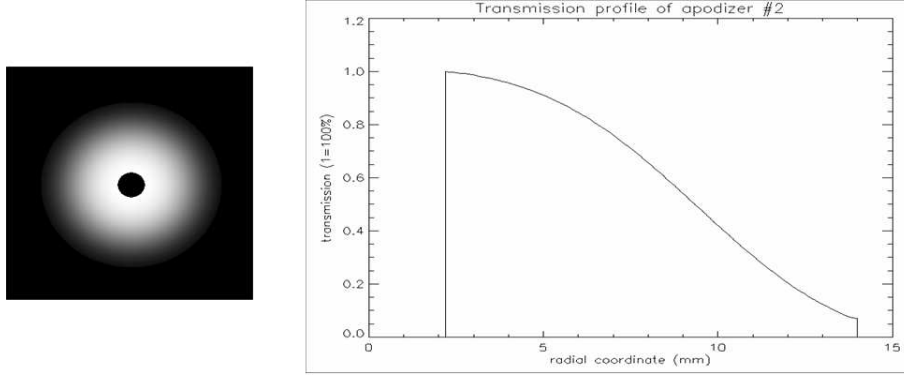


FIG. 4. Theoretical transmission of the apodizer in the visible send to the manufacturer : (left) 2D view, (right) optimal average radiale profile in transmission.

$T(r, \theta)$, can be be fitted from the numerical simulations. It is approximated by the 7th order polynomial defined by :

$$\forall \theta \quad T(r, \theta) = \sum_{k=0}^7 C_k * \left(\frac{r}{14}\right)^k \text{ with :}$$

- r given in mm and $2.1 \leq r \leq 14$.
- $C_0 = 0.95610110$, $C_1 = 0.99129289$, $C_2 = -7.6010470$, $C_3 = 26.988797$, $C_4 = -61.164585$, $C_5 = 70.131699$, $C_6 = -38.251457$ and $C_7 = 8.0134063$.
- The transmission profile in the area of radius smaller than 2.1 mm is of a lesser importance because this area will be occulted by the central obscuration of the pupil mask.

The complete experimental characterization of the apodizer is presented in the next section.

3.2.3 The Lyot coronagraphic mask

The Lyot coronagraphic mask blocks the light on a central disk of 90 μm diameter (which corresponds to an angular diameter of $3\lambda/D$) and is transparent outside. This element was also manufactured by the company Micromodule by a Chromium deposition on a BK7-substrate. Simulations allowed to determine that a value of 6 for the optical density of the opaque zone is necessary to obtain the desired coronagraphic effect. Table 4 gives the manufacturing specifications of the coronagraphic mask.

Characteristics	Specification
Tolerance on the component width (square)	$15.0 \pm 1.0 \text{ mm}$
Tolerance on the coronagraphic mask diameter	$90.0 \pm 1.0 \text{ mm}$
Mask optical density	6.0 ± 0.5
Substrate type	BK7 or N-BK7
Substrate thickness	1.5 mm
Substrate optical quality	$\lambda/4$ PTV at $\lambda = 633 \text{ nm}$ on the front face
Substrate parallelism	$\leq 1'$

TAB. 4. Specifications of the $3\lambda/D$ Lyot coronagraphic mask.

3.2.4 The Lyot stop

The Lyot stop has the same shape as the one of the VLT pupil mask. It was also manufactured by the Micro-module company by a Chromium deposition on a BK7 substrate. This diaphragm is geometrically homothetical to the pupil mask : the central obscuration diameter is slightly enlarged, the diameter of the external disk is slightly reduced, the spider arms are magnified but their orientation is identical to the pupil mask ones.

Some simulations showed that the best Lyot diaphragm (according to a criterion obtaining the optimal attenuation without too reducing the transmission) has the following properties : an outer diameter corresponding to 97% of the size of the pupil image, a central obscuration that is 1.05 times larger compared to the obstruction size in the coronagraphic pupil plane, and spiders arms magnified by a factor 2. Furthermore, experience inherited from previous laboratory tests showed that it is preferable to slightly undersize the Lyot stop size to get rid of some instrumental biases such as, for instance, egde diffraction effects or tolerances on the lenses focal lengths.

Table 5 gives the manufacturing specifications of the Lyot stop.

Parameter	Specification
Outer diameter	$1.060 \pm 0.01 \text{ mm}$
Central obscuration diameter	$0.170 \pm 0.01 \text{ mm}$
Spiders width	$0.010 \pm 0.002 \text{ mm}$
Mask optical density	6 ± 0.5
Type de substrat	BK7
Substrate thickness	2 mm
Substrate optical quality	$\lambda/4$ PTV at $\lambda = 633 \text{ nm}$ on the front face
Substrate parallelism	$\leq 1'$

TAB. 5. Lyot stop manufacturing specifications.

4. APODIZER EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION

4.1 Apodizer average transmission profile

Principle. This measurement is done with the white light source coupled with a narrowband interferential filter ($\lambda_c = 603 \text{ nm}$, $\delta\lambda = 25 \text{ nm}$) placed in front of the source. The principle of the measurement is to acquire pupil images with and without apodizer, called respectively apodized and reference images. After a dark subtraction, a long exposure is generated for both pupil image types. Then, the apodized long exposure is divided by the reference one in order to avoid the inhomogenous illumination of the reference pupil. The radial transmission values of the apodizer are finally computed from this divided long exposure image.

Results. Fig. 5 shows an example of a reference and an apodized long exposure pupil images. Both long exposures are obtained by co-adding 5 snapshots of a 2 ms exposition time. It is then necessary to compare the measurement to the theoretical profile and to the tolerance limits : figure 5 shows the different average radial profiles.

The measurement doesn't meet the specifications in the area where r is included between 7 mm and 12.8 mm : the lower tolerance limit is overrun. Besides, the apodizer global transmission coefficient worths 39.9%, as expected in the specifications.

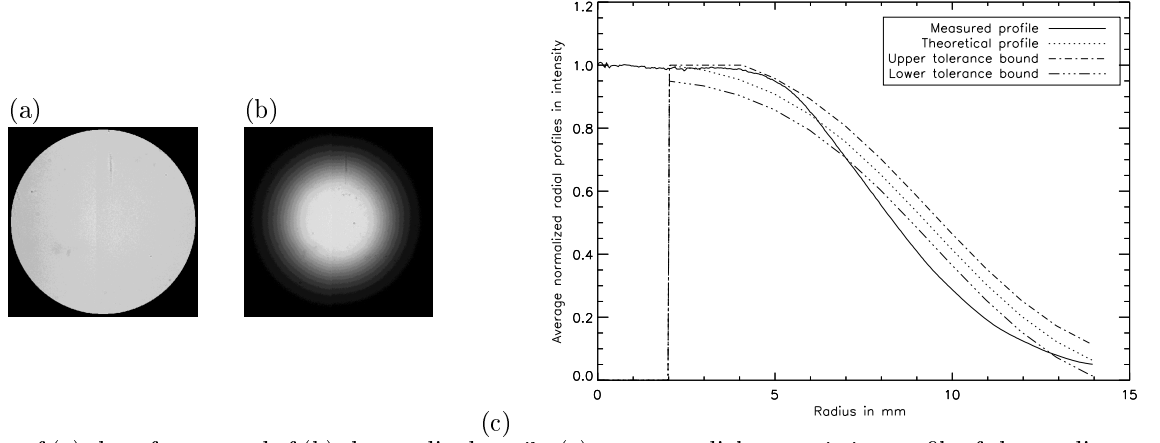


FIG. 5. 2D-views of (a) the reference and of (b) the apodised pupils, (c) average radial transmission profile of the apodizer : measured profile, theoretical profile, tolerance bounds.

4.2 Apodizer global transmittivity in the visible

To realize this measurement, we use the same experimental protocol as in the last section, using 15 spectral filters. Table 6 lists the properties of the 15 available spectral filters.

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
λ_c (nm)	421.5	432.5	445	485	513.5	535.5	550	545	558	563.5	574	584.5	603.5	661	700.5
λ_{min} (nm)	412	425	433	475	502	525	535	535	547	552	565	569	587	652	689
λ_{max} (nm)	431	440	457	495	525	546	565	555	569	575	583	600	620	670	712
$\Delta\lambda$ (nm)	19	15	24	20	23	21	30	20	22	23	18	31	33	28	23

TAB. 6. Inventory of the spectral filters.

Figure 6 shows the spectral evolution of the global transmission of the apodizer deduced from the measurements compared to the theoretical one. The measurement for the two first filters is biased by a too faint flux at the detector level. To obtain the theoretical curve, we made the calculation of the transmission coefficient of an Inconel coating on a BK7 glass substrate using thin film theory equations described by Born & Wolf (1979⁴) and the value of the Inconel refractive index determined by Goodell et al. (1973⁷).

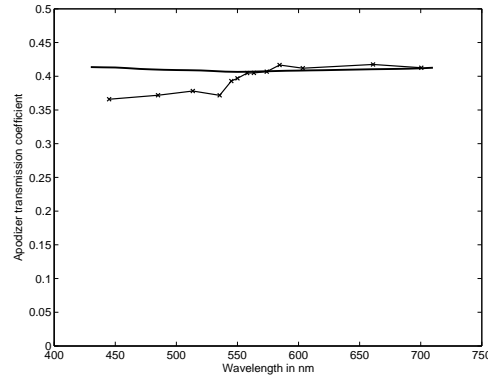


FIG. 6. Measurement of the transmission coefficient of the apodizer (crosses) compared to the numerical simulation (solid line).

Except for the four first filters, the measurement is totally in adequation with the numerical simulation. This result validates the method used to calculate the theoretical curve. We can conclude that on the spectral domain [450 nm - 700 nm], the transmission coefficient of the apodizer worths $39 \pm 3\%$.

4.3 Apodizer global reflectivity in the visible

Figure 7 shows the optical setup to measure the apodizer reflectivity.

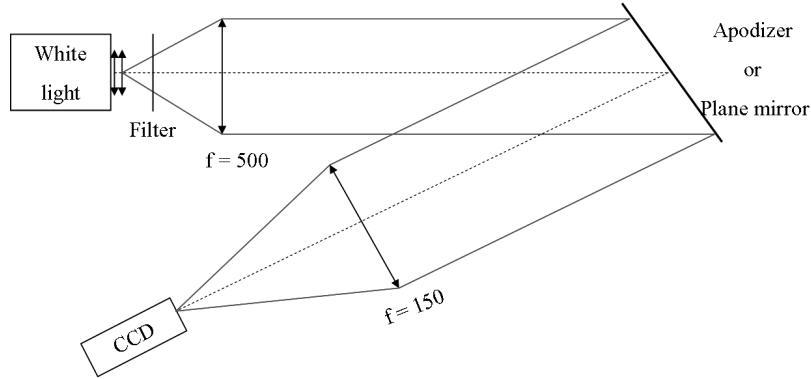


FIG. 7. Optical setup for the measurement of the apodizer reflectivity.

The apodizer is slightly inclined from the optical axis so as to generate a reflected beam sufficiently disjoined from the incident one to be imaged on the CCD camera. To obtain a reference measurement, the apodizer is replaced by a plane mirror in aluminium. The reflectivity coefficient of this mirror worths 90%. The measurements were carried out using the same experimental protocol as for the transmission coefficient measurement.

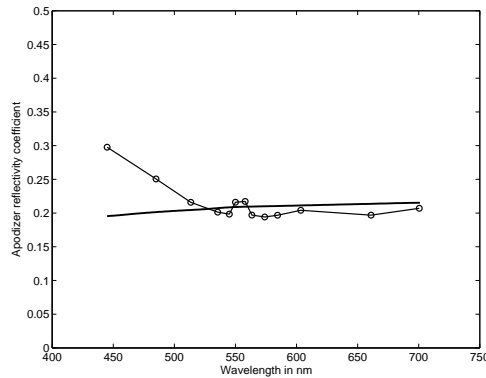


FIG. 8. Measurement of the apodizer reflectivity coefficient (dotted) compared with the numerical simulation (solid line).

Figure 8 shows the evolution of the measured reflectivity coefficient compared, as previously, with the simulation obtained with the same computation code. It wasn't possible to obtain exploitable data for filters number 1 and 2, the recorded flux was too faint.

Except for the 2 first wavelengths, the mesured curve complies with the numerical simulation. The apodizer global reflectivity worths $21 \pm 1\%$ on the spectral domain [450 nm - 700 nm].

5. ALC NULLING PERFORMANCES

5.1 Measurement principle

Acquisitions are done in the final coronagraphic focal plane with the fibered laser diode ($\lambda = 633nm$). Three different Point Spread Functions (PSF) are successively recorded : the reference one, the reference apodized one and the coronagraphic one. It was necessary to place neutral densities behind the light source to avoid the saturation of the detector. Thousand short exposures (with dark subtraction) are co-added to obtain the long exposure.

5.2 Results

Fig. 9 shows the measurements of the reference non apodized PSF (integration time $Ti = 5\text{ ms}$, neutral density $ND = 6.5$), the Reynard apodized PSF ($Ti = 30\text{ ms}$, $ND = 6.5$) and the coronagraphed PSF ($Ti = 30\text{ ms}$, $ND = 4.6$), compared with simulations. The latter takes into account the real transmission profile of the Reynard apodizer, as measured in Sect. 4.1. For the 2D-images, the color scale was modified to enhance contrast and visibility. The effect of the apodizer is clearly visible through the shift of the Airy rings between the reference and the apodized PSFs. The coronagraphed apodized PSF has an elliptical shape. This effect, missing without the apodizer, is probably induced by the wavefront error or the coating defects introduced by the apodizer. The global shape of the measured PSFs is consistent with the simulations. For off-axis distances greater than λ/D , there is an offset in intensity between experimental results and simulations in the PSF wings for both types of reference PSF. In addition, the minimal intensity in the Airy rings of all the PSFs are much lower than that expected : it is essentially due to the fact that we are limited by a low dynamics of the 10-bits CCD camera.

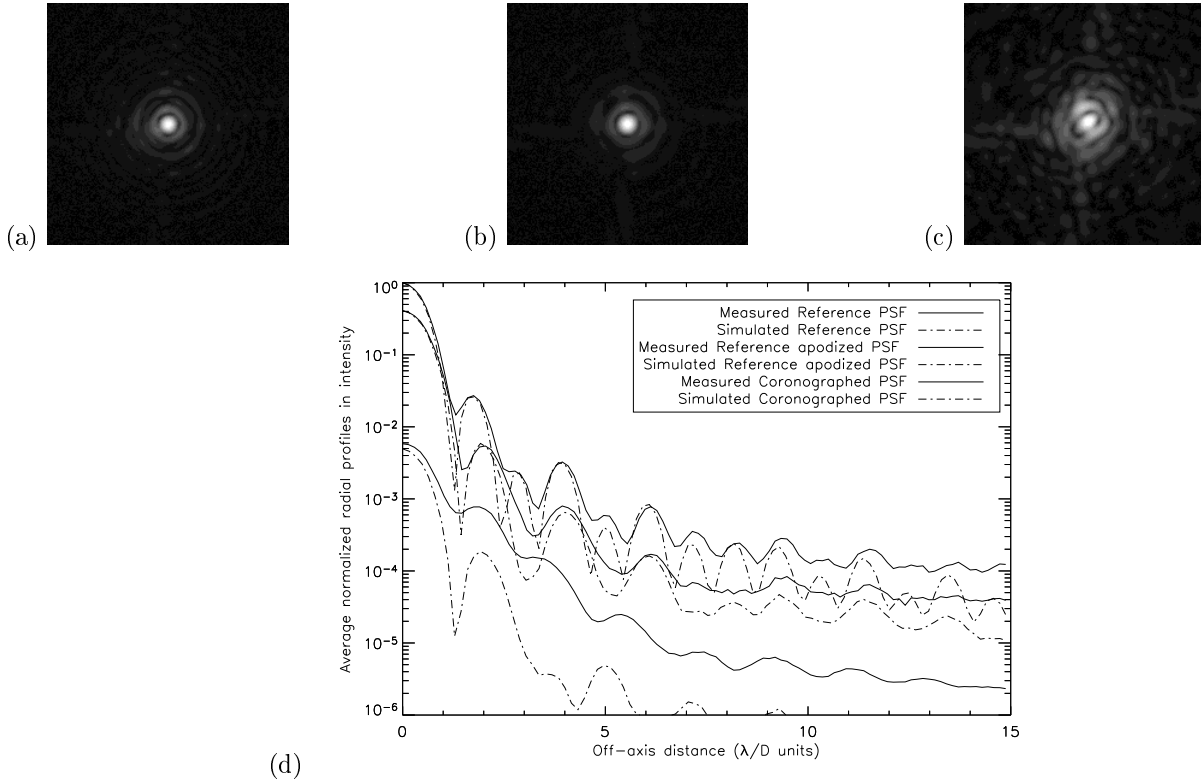


FIG. 9. Laboratory measurement at $\lambda = 633\text{nm}$: (a) Reference non apodised PSF, (b) Reference apodised PSF, (c) Coronagraphed apodized PSF, (d) average normalized radial profiles in intensity compared with simulations.

Several sets of acquisitions were done : Table 7 gives the ALC coronagraphic performances deduced from these measurements compared with simulations. For the peak attenuation, they agree with expectations. For the rejection ratio, the difference is due to the CCD low dynamics.

	Experimental value	Theoretical value
Peak attenuation for the ALC (from the apodized reference PSF)	71 ± 11	72
Peak attenuation for the ALC (from the reference PSF)	170 ± 25	202
Rejection ratio for the ALC (from the apodized reference PSF)	34 ± 10	65
Rejection ratio for the ALC (from the reference PSF)	80 ± 30	157

TAB. 7. ALC coronagraphic performances at $\lambda = 633\text{nm}$: comparison between experiment and simulations.

6. ALC SENSITIVITY TO MISALIGNMENTS OF ITS COMPONENTS

In this section, the 3 main components of the ALC, the apodizer, the coronagraphic mask, and the Lyot stop, are successively laterally then longitudinally misaligned from their ideal position. All measurements were done in the HeNe monochromatic light.

Figure 11 shows the resulting coronagraphed PSFs corresponding to both lateral and longitudinal misalignments for the apodizer, the coronagraphic mask and the Lyot stop. We can identify with this figure what are the critical elements concerning the mechanical positioning on the bench : the coronagraphic mask in the lateral position and the Lyot stop in both positions.

In order to evaluate the specifications on the positioning of the ALC components, several coronagraphic metrics were used in addition to the evolution of the PSFs shapes which is a subjective criterion. We plotted the evolution of the extinction and rejection ratios as a function of the displacement value : an example concerning the coronagraphic mask lateral misalignment is given on Figure 10 and constitutes a good proof of the great dependency of the ALC performances to the lateral misalignment of the coronagraphic mask. For each misalignment value, we also determined the contrast evolution, ie the ratio between the average radial profile of the coronagraphed PSF with the displacement, and the average radial profile of the coronagraphed PSF for the ideal position : we look for the displacement value inducing a loss of contrast lesser than 10% that corresponds to the average level of noise.

Table 8 gives the specifications on absolute positioning for the three ALC components deduced from these criteria and metrics.

Component	Lateral tolerance	Longitudinal tolerance
Apodizer	$\pm 5 \text{ mm}$	$\geq 5 \text{ mm}$
Lyot coronagraphic mask	$\leq 0.01 \text{ mm}$	$\pm 1 \text{ mm}$
Lyot stop	$\pm 0.04 \text{ mm}$	$\pm 0.5 \text{ mm}$

TAB. 8. Synthesis of the tolerances values on the positioning of the ALC components obtained by measurements.

Furthermore, we can notice that the same tendencies were found with an other ALC prototype tested in the near Infrared (Guerri et al. 2008⁹ , Boccaletti et al. 2008³).

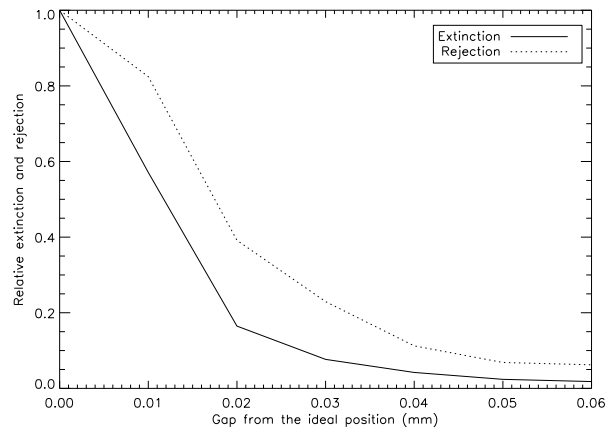
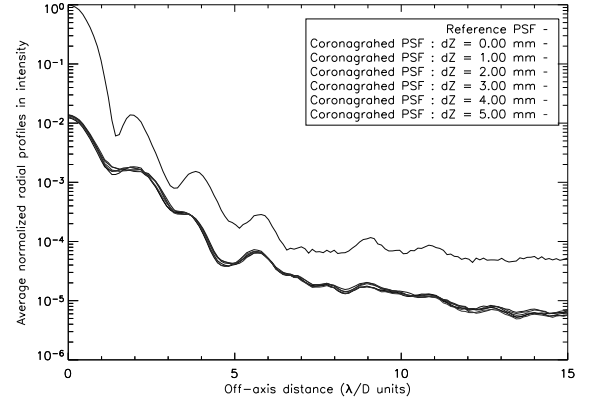
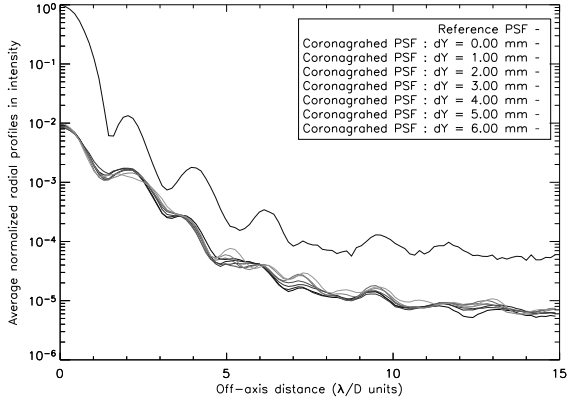
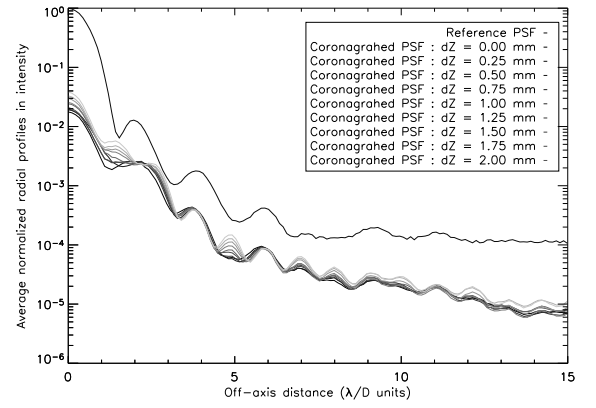
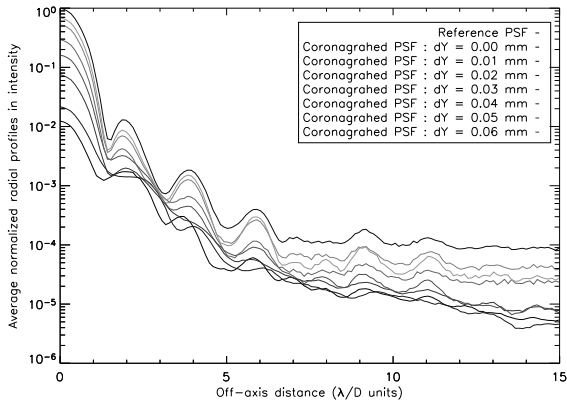


FIG. 10. Example of coronagraphic metrics used to determine the specifications on the positioning of the ALC components : evolution of the extinction (solid line) and rejection (dash-dotted line) ratios as a function of the coronagraphic lateral displacement values ΔY , from 0 to 0.06 mm.

Apodizer lateral and longitudinal misalignments



Coronagraphic mask lateral and longitudinal misalignments



Lyot stop lateral and longitudinal misalignments

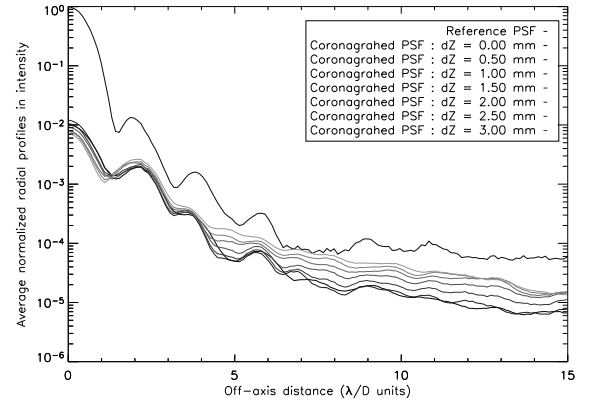
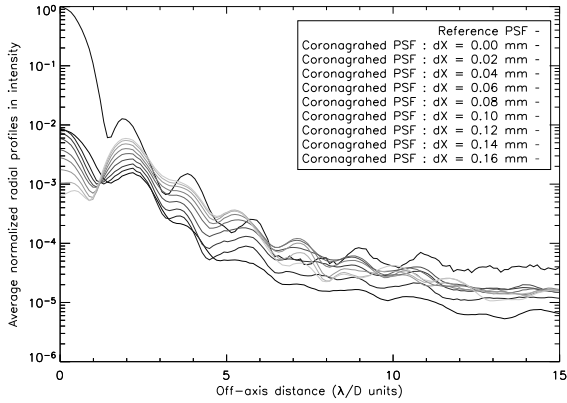


FIG. 11. Effect of the lateral and longitudinal displacements of the ALC main components : apodizer, coronagraphic mask and Lyot stop. For each component, the left curve corresponds to the lateral misalignment and the right curve to the defocus.

7. CONCLUSION AND FUTURE PROSPECTS

We presented the results of the experimental characterization in the visible of an Apodized Lyot Coronagraph prototype that was designed for a preliminary concept feasibility study for the VLT-SPHERE instrument. Several type of measurements were carried out, the main conclusions that can be drawn are :

- apodizer characterization : the transmission profile is out of the tolerance limits between radius 7 *mm* and radius 12.8 *mm*. Nevertheless, the apodizer global transmission and reflectivity coefficients in the visible worth respectively 39% and 21% which is consistent with the simulations.
- ALC coronagraphic performances in the visible : the PSFs global behavior and the extinction ratio are consistent with the simulations. However, the lack in dynamics of the detector limits the rejection and the dynamics of the PSFs.
- estimation of the ALC sensitivity to the lateral and longitudinal misalignment of its three main components : the coronagraph is very sensitive to lateral displacements of the coronagraphic mask and of the Lyot stop, and to the Lyot stop defocus.

We can finally conclude that these tests lead to consider the ALC as potential coronagraph for the VLT-SPHERE instrument and allowed the start of the study and the development of an ALC in the near-infrared suitably designed and dedicated to SPHERE (Carbillet et al. in prep.,⁵ Guerri et al. in prep⁹).

The future prospects concerning the use of the High Dynamics range imaging bench of the laboratory is the integration of a deformable mirror to generate wavefront residual errors (Guerri et al.⁸). The goal is to study the effects of these errors on the ALC coronagraphic performances.

ACKNOWLEDGMENTS

The experiments reported in this article has been supported by the district of Provence Alpes Côte d’Azur (PACA), CNRS and ASHRA. G. Guerri is grateful to CNRS, the PACA district and Sud-Est Optique de Précision (France) for supporting her PhD thesis.

REFERENCES

- [1] Aime, C., Soummer, R. & Ferrari, A., 2002, A&A, 389, 334
- [2] Beuzit, J.-L., Feldt, M., Dohlen, K. et al., 2006, The Messenger, 125, 29
- [3] Boccaletti, A., Abe, L., Baudrand, J., Daban, J.-B., Douet, R., Guerri, G., Robbe-Dubois, S., Dohlen, K. and Mawet, D., Proc. SPIE, 2008
- [4] Born, M., Wolf, E., 1979, Principles of Optics, 7th edition, Cambridge University Press, 499
- [5] Carbillet, M., Bendjoya, P., Guerri, G. et al., A&A, in preparation
- [6] Carlotti, A., Ricort, G., Aime, C., Azhari, Y.E., Soummer, R., 2007, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 24C
- [7] Goodell, W.V., Coulter, J.K. and Johnson, P.B., 1973, J. Opt. Soc. Am., 63, 85
- [8] Guerri, G., Daban, J.B., Abe, L., Bendjoya, P., Vakili, F., Sarry, J., Auroux, S. & Carbillet, M., Proc. SF2A, p.277, 2005.
- [9] Guerri, G., Daban, J.B., Robbe-Dubois, S., Douet, R., Abe, L., Bendjoya, P., Carbillet, M., Vakili, F., Gouvret, C., Baudrand, J., Riaud, P., Boccaletti, A., Beuzit, J.L., Puget, P., Dohlen, .K, A&A, in preparation
- [10] Lyot, B., 1930, C. R. Acad. Sci. Paris, 4860, 171
- [11] Mayor, M. & Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
- [12] Soummer, R., Aime, C. & Falloon, P., 2003, A&A, 397, 1161
- [13] Soummer, R., 2005, ApJ, 618, L161
- [14] Soummer, R., Sivaramakrishnan, A., Oppenheimer, B. R., Macintosh, B. A., 2006, baas, 38, 1110

Annexe C

Article portant sur les simulations
numériques pour le projet
VLT-SPHERE soumis à A&A

Apodized Lyot coronagraph for SPHERE/VLT:

I. Preliminary numerical studies

M. Carillet¹, Ph. Bendjoya¹, G. Guerri¹, et al. encore à préciser...

UMR 6525 H. Fizeau, Université de Nice Sophia Antipolis, Centre National de la Recherche Scientifique, Observatoire de la Côte d'Azur, Campus Valrose, F-06108 Nice cedex 2

Received —; accepted —.

ABSTRACT

Context. SPHERE (which stands for Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) is a second-generation Very Large Telescope (VLT) instrument dedicated to high-contrast direct imaging of exoplanets which first-light is scheduled for 2011. Within this complex instrument one of the central components is the apodized Lyot coronagraph.

Aims. The principal aim of this paper is to report on the most interesting aspects of the whole numerical studies made during the design of the apodized Lyot coronagraph for SPHERE/VLT.

Methods. The methods followed for this study is purely numerical, but with an “end-to-end” approach which is largely fed by a number of instrumental feedbacks.

Results. The results obtained and presented in this paper firstly permit to finalize the optical design and laboratory performance testing of the apodized Lyot coronagraph being built for SPHERE/VLT, but will also hopefully help future other instruments alike, for example in the very promising extremely large telescope perspective.

Key words. Instrumentation: coronagraphy – Instrumentation: high angular resolution – Methods: numerical – Telescopes

1. Introduction

The second-generation Very Large Telescope (VLT) instrument SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch - Beuzit et al. 2006) main goal being to achieve direct imaging of exoplanets with a possible first spectral characterization, coronagraphy is almost mandatory. A number of concepts have been proposed these last years of very exciting developments in the field of stellar coronagraphy. In the framework of SPHERE and as a result of its preliminary studies, the four-quadrant phase mask (Rouan et al., 2000) in one hand and the apodized Lyot coronagraph (ALC - Aime, Soummer & Ferrari, 2002) in the other hand have been chosen (in addition to the classical Lyot coronagraph). In the present paper we underline the most interesting aspects of the whole end-to-end numerical study we have achieved during the design of the ALC for SPHERE/VLT.

The paper is organized as follows. In section 2 we describe the computation of the transmission function that characterizes the apodized entrance pupil of the coronagraph. Section 3 focalizes then on the detailed physical modeling that has been used for the complete end-to-end numerical simulations that permitted to achieve the study presented here. Section 4 is then dedicated to the optimization of the ALC within the framework of the instrument SPHERE mounted on the VLT. A number of identified critical points are afterwards studied in details in Sec. 5. Finally, a conclusion is derived and the final foreseen performance are given in Sec. 6.

2. Apodization computation

The main point in considering an ALC (Aime, Soummer & Ferrari, 2002) is its apodized entrance pupil which aim is to reduce the diffraction wings with respect to a standard Lyot coronagraph (Lyot, 1930, Lyot, 1939), together with the advantage of a smaller focal opaque mask (reducing the inner-working angle of potential planet detection and characterization). It has been demonstrated in the literature, in the case of a rectangular aperture first (Aime, Soummer & Ferrari, 2002) and then for an arbitrary –but not obscured– aperture (Soummer, Aime & Falloon, 2003a), that when prolate spheroidal functions are considered for apodization of the entrance pupil, an optimal star-light extinction can be reached. It is worthy to note that the total extinction is analytically obtained for an infinite aperture only – and hence no light at all, neither from the star nor from the planet ! As a consequence, a solution of this optimization can be found for any mask size – keeping in mind that the larger the mask, the lower the residual star light but also the stronger the apodization hence the lower the transmission and finally the lower the number of photons from the planet. In this section we are hence only determining a series of couples mask@apodizer for which the apodizer is the optimal one for a given mask size, i.e. the mask size for which the residual energy present in the pupil plane where a Lyot stop is classically placed (in order to get rid of the light diffracted outside the entrance pupil image) is minimal. Note that this pupil plane is located immediately after the focal plane where the opaque mask is placed. Although a complete sketch of the optical setup can already be found in Aime & Soummer (2002), Abe (2004), Boccaletti (2004), Ferrari, Soummer & Aime (2007), Martinez et al. (2007) or Soummer et al. (2008), we reproduce it in Fig. 1 for sake of

Send offprint requests to: Marcel Carillet e-mail: marcel.carillet@unice.fr

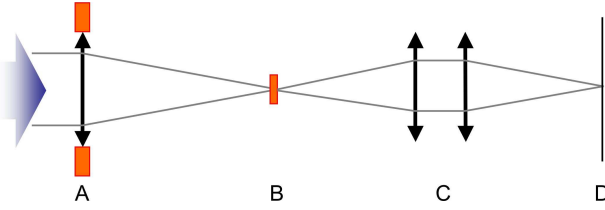


Fig. 1. Typical optical setup corresponding to an ALC. The first pupil plane (plane A) is apodized. An opaque mask is placed in the following first focal plane (plane B), while a Lyot stop is possibly placed in the second pupil plane (plane C) and the coronagraphic image is formed in the final focal plane (plane D).

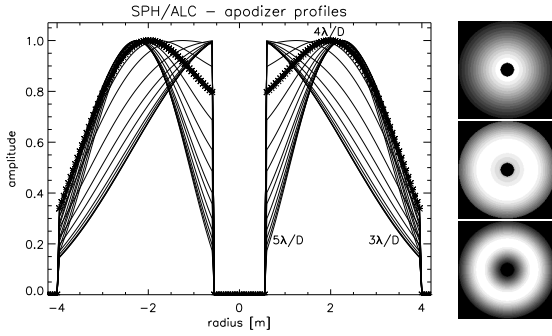


Fig. 2. Left: profiles of the computed apodizers for a mask of $3\lambda/D$ to $5\lambda/D$, with a step of $0.1\lambda/D$. The apodizer computed for $4\lambda/D$ is evidenced. Right: bidimensional representation of three of the computed apodizers, from $3\lambda/D$ (top) to $5\lambda/D$ (bottom), and through $4\lambda/D$ (middle).

clarity. The usual approximations of paraxial optics is made. Moreover, it is also assumed that there is a simple Fourier transform relationship between each successive plane.

In order to compute these couples mask+apodizer, we have to face the fact that the prolate solutions evoked here before only apply to unobscured apertures. In the case of obscured apertures like the VLT one, a numerical approach is necessary, following the iterative algorithm of Guyon & Roddier (2000) which efficiency in the ALC case has been proven (Soummer, Aime & Falloon, 2003b). Specific solutions for circular apertures with a central obscuration have also been studied (Soummer, 2005).

Figure 2 shows the apodizers obtained for different mask sizes ranging from $3\lambda/D$ to $5\lambda/D$ (corresponding to an approximate range $0''.12$ – $0''.21$ in band H , $1.65\mu\text{m}$). One can notice the evolution, as the mask size increases, from a “bell” shape, typical of a weak obstruction, down to a “bagel” shape, typical of a strong obstruction.

In Sec. 4 we use the resulting couples mask+apodizer in order to find the optimum one (i.e. the best trade-off between a small mask size and a high coronagraphic effect) with respect to the rest of the characteristics of the telescope and the instrument. Next section hence details the physical modeling considered for this optimization and the whole ensemble of following tests performed within this paper.

Type of aberration	<i>rms</i>
Instrument	34.5 nm
AO calibration	7.4 nm
Fresnel propagation	4.7 nm
Beam shift	8.0 nm

Table 1. Instrument optical aberrations considered for the present end-to-end simulations.

3. Instrument physical and numerical modeling

A dedicated numerical tool has been developed for the whole instrument SPHERE, whiling to have a common basis from system studies to data simulation for data-reduction and science-cases testing. It is hence currently used to carry out a thorough system analysis and address critical points in the instrument opto-mechanical concept, to provide typical images delivered by the instrument in order to develop appropriate algorithms relevant to exoplanet detection, and finally to evaluate the performance of the instrument for some realistic astrophysical targets. The resulting tool, the *Software Package SPHERE*, is IDL-based, was developed under the CAOS problem-solving environment (Carbillet et al., 2004), and includes modeling of the extreme adaptive optics (AO) system SAXO (SPHERE Adaptive optics for eXoplanet Observations - Petit et al., 2008), the common optical path of the instrument and the three sub-instruments IRDIS (InfraRed Dual Imager and Spectrograph - Dohlen et al., 2008), IFS (Integral Field Spectrometer - Claudi et al., 2008), and ZIMPOL (Zurich IMaging POLarimeter - Thalmann et al., 2008). A detailed description of the tool can be found in Carbillet et al. (2008).

For what concerns this paper, a part only of these capabilities were used: namely the physical modeling of the common optical path part and the coronagraph+IRDIS image formation part. The whole simulation code is base on Fourier analysis: both phase screens and amplitude masks are introduced in the successive pupil and focal planes where they respectively occur along the global propagation from the entrance pupil to the final coronagraphic image onto the science detector. No Fresnel propagation is considered in order to explicitly tackle with intermediate optical defects. The common optical path simulation code aims at generating static aberrations upstream the coronagraph (from the telescope to the instrument) from the power spectral densities resulting from the global system study performed for the instrument. Table 1 resumes the *rms* considered and corresponding to each of the four types of aberration identified and taken into account for the simulations presented within this paper. The first two errors directly come from the system analysis evoked before. The third error is due to the fact that the Fresnel propagation of defects not located in a pupil plane is chromatic and hence cannot be properly corrected, the wavefront sensing wavelength range (visible) differing from the observing wavelength (near-infrared). The fourth error is a remaining wavefront error coming from the fact that, because of atmospheric differential refraction, a beam shift occur before correction of it by the atmospheric dispersion corrector (ADC) and hence the AO system does not correct from the exact wavefront aberration.

Maps of the telescope aberrations at the level of the three consecutive VLT mirrors $M1$, $M2$, and $M3$, are also considered, but low frequencies were removed in order to take into account the filtering that is performed by the AO system SAXO. Unperfect behavior of the ADC is also taken into account via variations of the PSF pointing. A more detailed description of the

various system aberrations considered along the end-to-end numerical simulations performed for the instrument can be found in Boccaletti et al. (2008).

4. Apodizer optimization for SPHERE/VLT

Optimizing the apodizer consist here in making full simulations of the system, but without atmospheric turbulence and subsequent AO correction, and computing the contrast K' obtained at different distances $\rho = \rho_0$ from the central star in the final focal plane of the coronagraph, for each couple mask+apodizer characterized by the mask size (i.e. mask diameter) s . Hence the contrast $K'_{\rho_0}[s]$ can be expressed as:

$$K'_{\rho_0}[s] = \frac{\max(I'_s[\rho, \theta])}{\langle I_s[\rho_0, \theta] \rangle_\theta}, \quad (1)$$

where I_s is the final focal plane image obtained with the whole coronagraph (pupil plane apodizer *and* focal plane mask) and considering the mask size s , I'_s is the final focal plane image obtained with the pupil plane apodizer only (no focal plane mask) and considering the same mask size s , ρ and θ are the polar co-ordinates within the final focal plane, ρ_0 is a particular value of ρ (0'2, 0'5, 1'0 and 2'0 here), and $\langle \rangle_\theta$ is an average value over the angles θ (ranging from 0 to 2π radians).

At this stage, if the PSF morphology is not properly taken into account, one basically finds a slightly different optimized couple mask+apodizer for each off-axis distance ρ_0 . As already said, the distances considered here were 0'2, 0'5, 1'0 and 2'0, roughly corresponding to distances in terms of λ/D ranging from 5 to 50 for the instrument-defined narrow band $H2$ (1.56–1.614 μm), which is a primary observation band for SPHERE/IRDIS. The optimal couples found were in fact ranging from a mask size s of $3.8 \lambda/D$ to $4.3 \lambda/D$. The PSF morphology can be taken into account by multiplying the computed contrasts K' with the maximum intensity of the apodized PSF. One so obtains a *modified* contrast K such as:

$$K_{\rho_0}[s] = K'_{\rho_0}[s] \times \max(I'_s[\rho, \theta]) = \frac{(\max(I'_s[\rho, \theta]))^2}{\langle I_s[\rho_0, \theta] \rangle_\theta}. \quad (2)$$

As it can be easily remarked from Fig. 3, the optimal contrast K is clearly obtained for a mask size s of $4 \lambda/D$ for each of the off-axis distances ρ_0 considered. This criterion is very close to the ALC optimization criterion chosen in a similar paper for the general case of extremely large telescopes by Martinez et al. (2007), at the main difference that the *modified* contrast computed here is not averaged over a wide range of off-axis distances but considered as a function of the off-axis distance itself.

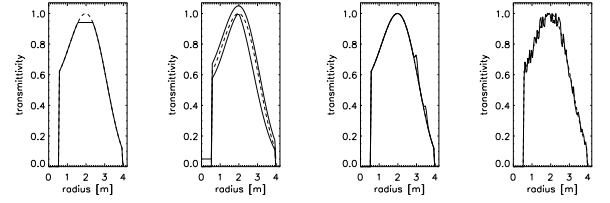


Fig. 4. Generic defects simulation. Top-left: the ideal $4 \lambda/D$ apodizer transmission profile together with two profiles mimicking an excess and a default of material deposition. Top-right: simulation of the presence of a bump at two different locations. Bottom-left: simulation of ruggedness in the transmission profile. Bottom-right: presence of a plateau at the maximum transmission location (problem of profile saturation).

5. Critical-points studies

In this section we focus on different points that can potentially be identified as critical for the performance of the ALC, and particularly for the apodizer itself.

5.1. Defects of the apodizer profile

Due to the thin layer evaporation technique used to manufacture the apodizer, this later will result with imperfections. At what extent these imperfections can be neglected, considering the whole set of others imperfections coming from the various optical components of the system ? This is the point we are tackling with in this subsection.

Several apodizers with different defects were hence computed and then considered into our numerical modeling of the whole system in order to apprehend the resulting effects on the coronagraphic performances. Benefitting from our previous experience in the prototyping of apodizers, we have considered realistic defect sources such as :

- a discrepancy from the ideal transmission profile due to an excess or a default of material deposition,
- the presence of a bump at different locations along the profile due to a possible non-linearity in the deposition process (testing then the influence of the position of such a bump),
- the presence of ruggedness simulating a non-smooth deposition,
- the presence of a plateau close to the location of the maximum of the transmission mimicking an over-deposition in this critical region of the apodizer.

Fig. 4 shows an illustration of these four generic simulated defects.

For each generic case, we have simulated several amplitudes of the considered defect so as to provide some specifications on the tolerance on the apodizer transmission profile. In order to quantify the influence of these simulated defects on the performance of the ALC, we have introduced these anomalous apodizers in our numerical simulations considering the optical common path aberrations. The corresponding coronagraphic performances have then been evaluated by considering the PSF raw contrast at 0'5, a value of major interest because of its location in the middle of the region where the PSF is “cleaned”, thanks to the extreme AO correction allowed by SAXO.

Due to the particularly non-sharp maximum characterizing the evolution of the raw contrast $K'_{\rho_0}[s]$ of the ALC at 0'5 as a function of the mask size s (see Fig. 3 left) in the interval 3.8 – $4.3 \lambda/D$, we have considered that the presence of a defect would be acceptable if its computed coronagraphic contrast would be

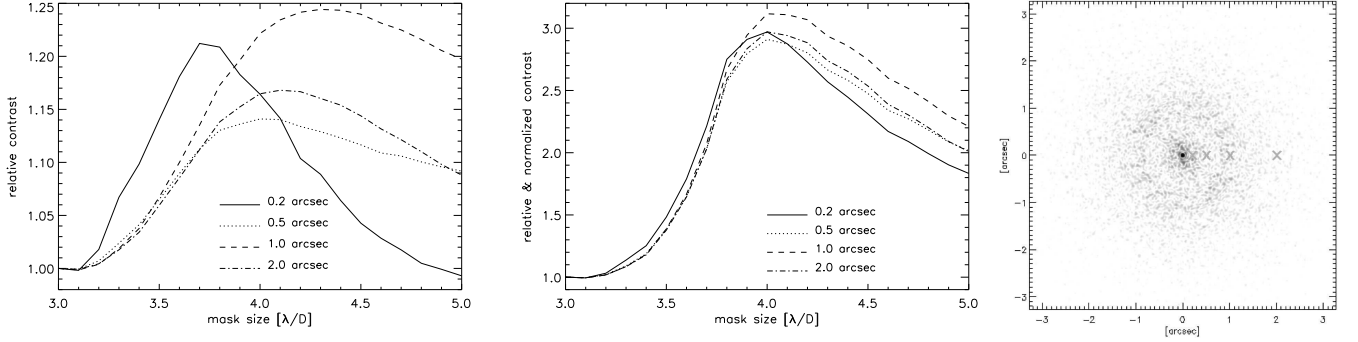


Fig. 3. Left: raw contrast $K'_{\rho_0}[s]$ of the ALC as a function of the mask size s and for different off-axis distances ρ_0 . For sake of clarity and better comparison each contrast curve is also actually normalized with respect to its first computed value $K'_{\rho_0}[3\lambda/D]$. Middle: *modified* (and normalized to its first computed value) contrast $K_{\rho_0}[s]/K_{\rho_0}[3\lambda/D]$. Right: bidimensional representation of the $4\lambda/D$ coronagraphic image ($I_s[\rho, \theta]$ in the text, with $s=4\lambda/D$ here). The off-axis planet positions ρ_0 ($0''.2$, $0''.5$, $1''.0$ and $2''.0$ here) are indicated by grey crosses.

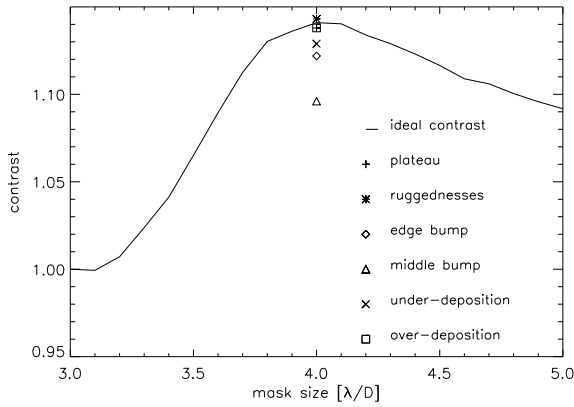


Fig. 5. Raw contrast at $0''.5$ for some anomalous apodizers superimposed to the ideal case.

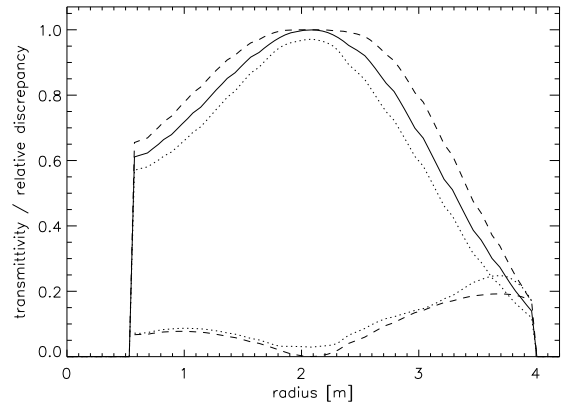


Fig. 6. Top: the upper and lower limit of the acceptable transmission profile. Bottom: $\Delta(r)$ relative local error for both upper and lower limiting profiles as a function of the radius r .

equivalent to the contrast obtained with an ideal apodizer the size of which remains in the interval defined above. As an illustration of this quantitative study of the influence of apodizer defects on the ALC performance, we propose in Fig. 5 a sample of contrast degradations due to the defects superimposed to the ideal case.

From the set of simulated defects, we deduced the upper and lower tolerance bounds for the apodizer transmission profile which are shown in Fig. 6. Moreover, this figure shows the distribution of the relative discrepancies $\Delta(r)$ as a function of the radius r of the apodizer for both tolerance profiles. $\Delta(r)$ is defined as follows :

$$\Delta(r) = \left| 1 - \frac{\text{ideal apodizer}(r)}{\text{anomalous apodizer}(r)} \right| \quad (3)$$

5.2. Phase defects effect

The apodizer is manufactured by thin layer evaporation of a metal on a glass substrate : Inconel 600TM was deposited on a substrate of CaF_2 . In addition to the needed apodizer transmittivity, it is crucial for the instrument design to determine the reflectivity and the absorption coefficients of the apodizer, and also the wavefront error introduced by this optical component. We studied the theory of light propagation in a medium composed of an absorbing film on a transparent substrate. Figure 7 shows the

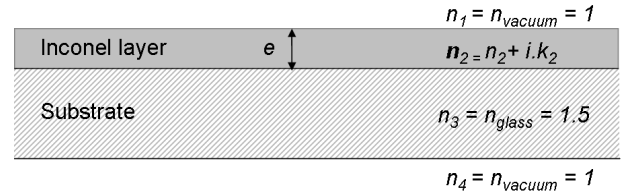


Fig. 7. Description of the different layers taken into account for the computation of the apodizer reflectivity and wavefront error introduced in transmission.

configuration for the deposition process we have taken into account. We considered four media and we denote by subscripts 1, 2, 3 and 4 the quantities which refer to each respective medium : vacuum, Inconel 600TM layer, CaF_2 substrate and vacuum.

Using thin film theory equations described by Born & Wolf (Born & Wolf, 1979), we can calculate the optical constants of the apodizer Inconel 600TM coating (we consider the case of normal incidence to simplify the equations). These features can be conveniently expressed in terms of the reflection (r_{ij}) and transmission (t_{ij}) coefficients at the interface between a medium i and a medium j . One of these features particularly interesting for us here, is the phase error that the apodizer introduces in the wavefront. The expression of the phase change δ_i introduced in transmission by the apodizer is :

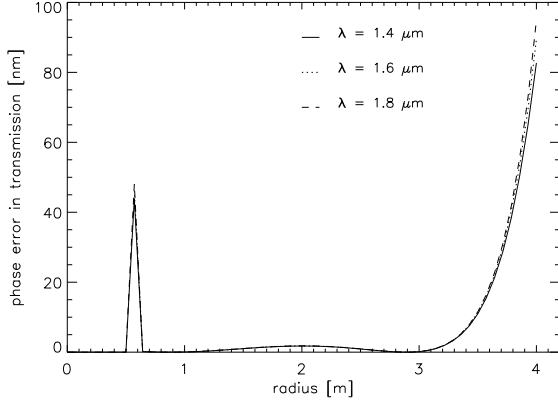


Fig. 8. Wavefront error profiles introduced in transmission by the apodizer over the whole H band: for a better visualization, only the curves for λ_{\min} , λ_{center} and λ_{\max} of the spectral range are plotted.

$$\tan(\delta_t - \chi_{12} - \chi_{23} + n_2\eta) = \frac{e^{2k_2\eta} \cdot \sin(2n_2\eta) - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \sin(\phi_{12} + \phi_{23})}{e^{2k_2\eta} \cdot \cos(2n_2\eta) - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \cos(\phi_{12} + \phi_{23})} \quad \text{with } \eta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot e \quad (4)$$

where :

- χ_{ij} is the phase of the transmission coefficient t_{ij} ,
- ρ_{ij} is the modulus of the reflection coefficient r_{ij} ,
- ϕ_{ij} is the phase of the reflection coefficient r_{ij} ,
- n_2 is the real part of Inconel 600TM refractive index,
- k_2 is the imaginary part of Inconel 600TM refractive index,
- λ is the operating wavelength,
- e is the thickness of the inconel layer which is preliminary determined by minimizing an error function obtained from the desired transmission profile.

These calculations are possible if we know the values of the real and imaginary parts of the refractive index of the Inconel 600TM. These data are extracted from Goodell et al. (Goodell, Coulter & Johnson, 1973). Reynard Corp. who manufactured the apodizer confirmed the validity of these data.

Figure 8 shows the wavefront error introduced in transmission by the apodizer for the minimum, central and maximum wavelengths of the H-band.

Furthermore, simulations were carried out in order to analyze the effect of the apodizer wavefront error on the coronagraphic performance. From the calculus of the phase defects profiles which has been showed in fig 8, we generate a data cube to model the apodizer. The first 2D array contains the modulus of the apodizer transmission and the second 2D array contains the 2D map of the phase introduced in transmission by the apodizer. This apodizer is then used for numerical simulations in order to calculate the corresponding coronagraphed PSF.

Figure 9 shows the mean resulting coronagraphed PSFs.

We can on the figure that the apodizer wavefront error reduces significantly the contrast when the Lyot stop is equivalent to the pupil. However, this effect can be cancelled out by reducing the Lyot stop diameter by a factor 0.98 (see Fig. 9). A factor of 0.96 should be chosen to take into account a possible stop-centering inaccuracy.

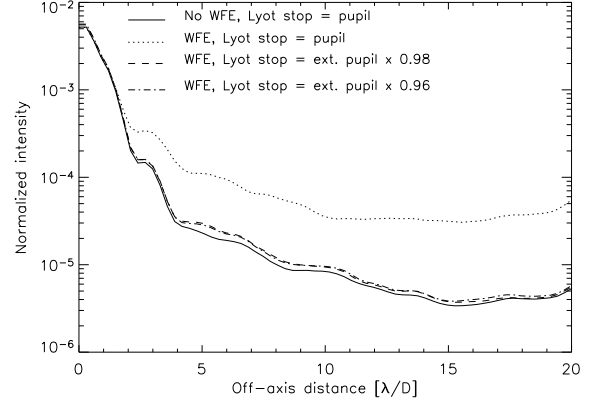


Fig. 9. Profile of the post-coronagraph PSF with phase defects and pupil stop.

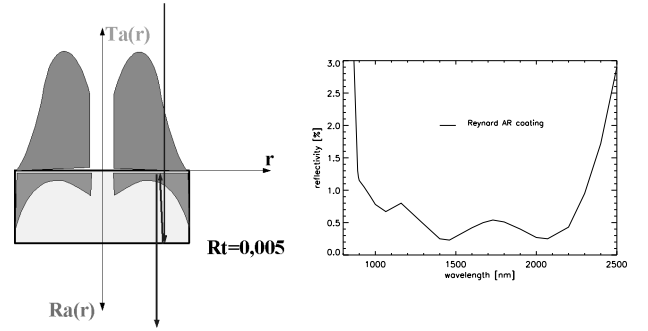


Fig. 10. Left: first-generation ghost produced by back reflection on the Inconel coated front-face (see text for explanations). Right: AR coating values versus wavelength provided by the apodizer manufacturer Reynard Corp.

5.3. Ghost analysis

This paragraph deals with the ghost created by reflection on the back face of the substrate and on the Inconel coated face. The calculation of the ghost pupil consists in multiplying the apodizer transmission, the back-face reflection and the apodizer reflection. This is illustrated in Fig. 10 (left part), where are roughly represented, as a function of the radial coordinate r , the transmission profile T_a and the reflection profile R_a of the Inconel coating. R_t is the reflective coefficient of the anti-reflection coated back face, and it is expected to be at least $< 1\%$ in bands Y , J , H , and Ks , and hopefully $< 0.5\%$ in Y , J , and H bands. As an illustration, the right part of Fig. 10 shows the antireflection (AR) coating of the prototype apodizer back face.

The absolute intensity $GP(r)$ in the ghost pupil is approximated by the following equation, which represents an approximate way of simulating the present issue since the substrate is supposed infinitely thin (which exempts from taking into account interference and diffraction):

$$GP(r) = T_a(r) R_t R_a(r) . \quad (5)$$

$R_a(r)$, the reflective profile of the apodizer, can be calculated using thin film theory equations described by Born & Wolf (Born & Wolf, 1979). Using the same formalism and notations as in section 5.2.

The expression of the apodizer reflectivity is :

$$R_a = \left| \frac{\rho_{12} \cdot e^{i\phi_{12}} + \rho_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\phi_{23} + 2n_2\eta)}}{1 + \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot e^{-2k_2\eta} \cdot e^{i(\phi_{12} + \phi_{23} + 2n_2\eta)}} \right|^2 \quad \text{with } \eta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot e , \quad (6)$$

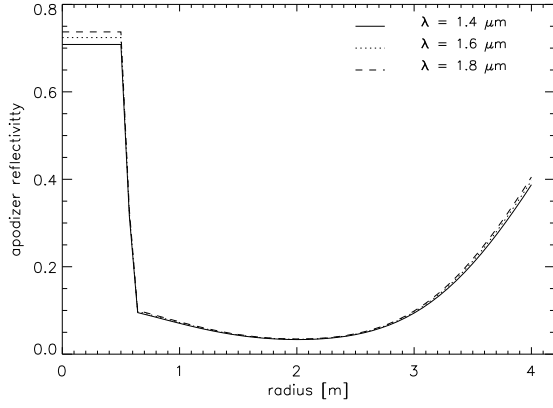


Fig. 11. Profiles of the apodizer radial reflectivity over the whole H band : for a better visualisation, only the curves for the λ_{\min} , λ_{center} and λ_{\max} of the spectral band are plotted.

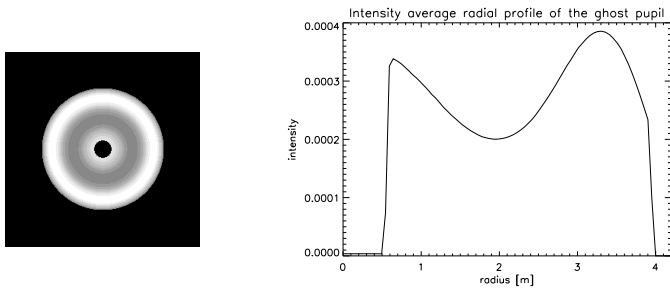


Fig. 12. View of the ghost pupil in H band.

where :

- ρ_{ij} is the modulus of the reflection coefficient r_{ij} ,
- ϕ_{ij} is the phase of the reflection coefficient r_{ij} ,
- n_2 is the real part of Inconel 600TM refractive index,
- k_2 is the imaginary part of Inconel 600TM refractive index,
- λ is the operating wavelength,
- e is the thickness of the inconel layer which is preliminary determined by minimizing an error function obtained from the desired transmission profile.

Figure 11 shows the calculated reflective profiles of the apodizer for the minimum, central and maximum wavelength of the H-band.

Calculations were made at other wavelengths inside *Y*, *J*, *H*, *K* bands which resulted in very similar profiles, confirming the apodizer relative achromaticity. The calculations also show that the global reflection rate of this Inconel coating is 16% for this apodizer. This result confirms that the absorption by the Inconel is quite important. Given that the global transmission of this coating is about 60%, the absorption is about 24%, value similar from *Y* to *Ks* within 1%.

From the reflective profile calculated above, and through Eq. 5, the ghost pupil can be obtained. Figure 12 shows the intensity profile of the ghost pupil (with the hypothesis that $R_t=0.5\%$).

This ghost pupil is then used for numerical simulations in order to calculate the PSF corresponding to the corresponding ghost at the end of the whole coronagraphic chain. Simulations were carried out in different cases of decentering of the ghost image with respect to the coronagraphic mask : ghost perfectly coronagraphed, ghost partially coronagraphed, and ghost lightly out of the mask. In Fig. 13 plotted ghost PSF profiles are shifted

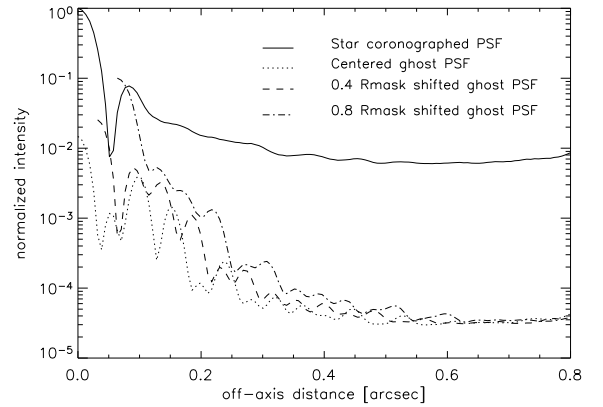
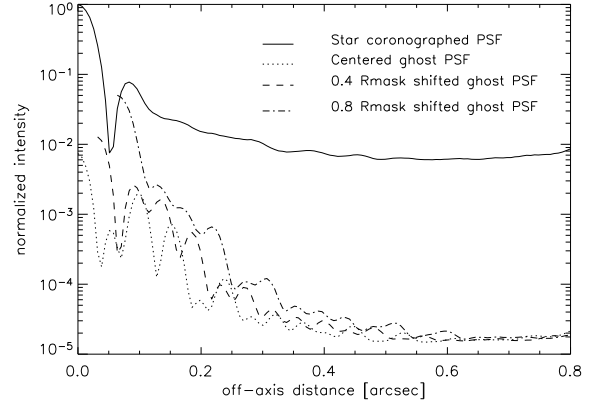


Fig. 13. Ghost raw PSF with atmospheric residuals and static aberrations for an AR coating of 0.5% (top) and 1% (bottom).

along the abscissa following the different cases of decentering. These simulations, performed in band H_2 (1.56 to 1.614 μm), take into account the instrumental static aberrations evoked before. The first plot is for an AR coating of 0.5%, the second one for an AR coating of 1%.

These simulations lead to conclude that, if the ghost misalignment with respect to the coronagraphic mask is less than $0.4 R_{\text{mask}}$, the ghost intensity is attenuated enough so that it does not reduce the contrast, even with an AR coating of 1%.

5.4. Tolerancing on the positioning of the ALC components ?

5.4.1. Apodizer decentering ?

5.4.2. Focal mask de-centering ?

5.4.3. Lyot stop decentering ?

5.5. Non-planar incoming wavefront ?

5.6. "Mixed case" ?

6. Conclusion

Acknowledgements. Thanks are due to...

References

- L. Abe, in "Astronomy with high contrast imaging II: instrumentation for coronagraphy and nulling interferometry", C. Aime & R. Soummer Eds, EAS Pub. Series 12, 157
- C. Aime. & R. Soummer, in "Astronomy with high contrast imaging: from planetary systems to active galactic nuclei", C. Aime & R. Soummer Eds, EAS Pub. Series 8, 79
- C. Aime., R. Soummer, A. Ferrari, 2002, *A&A*, 389, 334
- J.-L. Beuzit, M. Feldt, K. Dohlen, et al., 2006, *The Messenger* 125, 29
- A. Boccaletti, in "Astronomy with high contrast imaging II: instrumentation for coronagraphy and nulling interferometry", C. Aime & R. Soummer Eds, EAS Pub. Series 12, 165
- A. Boccaletti, M. Carbillet, Ch. Thalmann, et al., 2008, in "Advancements in Adaptive Optics", N. Hubin, C. E. Max, & P. L. Wizinowich Eds., SPIE Proc. 7015, submitted
- M. Born, E. Wolf, 1979, *Principles of Optics*, 7th edition, Cambridge University Press, 499
- M. Carbillet, C. V´erinaud, M. Guarracino, et al., 2004, in "Adaptive Optics Systems", D. Bonaccini, B. Ellerbroek, & R. Ragazzoni Eds., SPIE Proc. 5490 (2), 550
- M. Carbillet, A. Boccaletti, Ch. Thalmann, et al., 2008, in "Advancements in Adaptive Optics", N. Hubin, C. E. Max, & P. L. Wizinowich Eds., SPIE Proc. 7015, submitted
- R. Claudi, M. Turatto, R. Gratton, et al., 2008, in "Ground-based and Airborne Instrumentation", I. S. McLean & M. M. Casali Eds., SPIE Proc. 7014, submitted
- K. Dohlen, M. Langlois, M. Saisse, et al., 2008, in "Ground-based and Airborne Instrumentation", I. S. McLean & M. M. Casali Eds., SPIE Proc. 7014, submitted
- A. Ferrari, R. Soummer, and C. Aime, 2007, *C. R. Phys.* 8, iss. 3-4, 277
- W. V. Goodell, J. K. Coulter, and P. B. Johnson, 1973, *J. Opt. Soc. Am.*, 63, 85
- O. Guyon & F. Roddier, 2000, in "Interferometry in Optical Astronomy", P. J. L´ena & A. Quirrenbach Eds, SPIE Proc. 4006, 377
- B. Lyot, 1930, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 4860, 171
- B. Lyot, 1939, *MNRAS*, 4860, 171
- P. Martinez., A. Boccaletti, M. Kasper, et al., 2007, *A&A*, 474 (2), 671
- C. Petit, Th. Fusco, J.-M. Conan, et al., 2008, in "Advancements in Adaptive Optics", N. Hubin, C. E. Max, & P. L. Wizinowich Eds., SPIE Proc. 7015, submitted
- D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, et al., 2000, *PASP*, 112, 1479
- R. Soummer, C. Aime, and P. Falloon, 2003a, *A&A*, 397, 1161
- R. Soummer, C. Aime, and P. Falloon, 2003b, in "Astronomy with high contrast imaging: from planetary systems to active galactic nuclei", C. Aime & R. Soummer Eds, EAS Pub. Series 8, 93
- R. Soummer., 2005, *ApJ*, 618, L161
- R. Soummer, L. Pueyo, A. Sivaramakrishnan, and R. J. Vanderbei, 2008, accepted for publication by *Optics Express*
- Ch. Thalmann, H. M. Schmid, D. Gisler, et al., 2008, in "Ground-based and Airborne Instrumentation", I. S. McLean & M. M. Casali Eds., SPIE Proc. 7014, submitted

Annexe D

Article portant sur le travail
expérimental pour le projet
VLT-SPHERE soumis à A&A

Apodized Lyot Coronagraph for VLT-SPHERE :

II. Laboratory tests and performances of a first prototype in the near-infrared

G. Guerri¹, J.-B. Daban¹, S. Robbe-Dubois¹, R. Douet¹, L. Abe¹, P. Bendjoya¹, M. Carbillet¹, F. Vakili¹, C. Gouvret¹, J. Baudrand², P. Riaud², A. Boccaletti², J.-L. Beuzit³, P. Puget², K. Dohlen⁴, and D. Mouillet³

¹ Laboratoire H. Fizeau, UMR-CNRS 6525, Université de Nice Sophia-Antipolis, Observatoire de la Côte d’Azur, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 02, France

² Laboratoire d’Etudes Spatiales et d’Instrumentation en Astrophysique (LESIA), UMR-CNRS 8109, Observatoire de Paris-Meudon, 5, place Jules Jansen, 92195 Meudon cedex, France

³ Laboratoire d’Astrophysique Observatoire de Grenoble (LAOG), UMR-CNRS 5571, Université J. Fourier, 414, rue de la piscine, 38041 Grenoble cedex 9, France

⁴ Laboratoire d’Astrophysique de Marseille (LAM), Observatoire Astronomique de Marseille Provence, 2, place Le Verrier, 13248 Marseille cedex 4, France

Received xx/xx/08 / Accepted xx/xx/08

ABSTRACT

Context. SPHERE is a second-generation VLT-instrument dedicated to high contrast imaging of exoplanets. SPHERE first light is expected for 2010. The project is in the phase B study.

Aims. We report the first laboratory experiment of the Apodized Lyot Coronagraph (Aime et al. 2001) designed for the SPHERE instrument.

Methods. We tested the Apodized Lyot Coronagraph prototype of the Fizeau laboratory (Nice) on the IR coronagraphic bench of LESIA (Meudon).

Results. We measured the transmission profiles of the apodizer prototype and the coronagraphic performances of the apodized Lyot coronagraph in Y-, J-, and H-bands. The coronagraph sensitivity to lateral and longitudinal misalignments of its three main components (apodizer, coronagraphic mask and Lyot stop) in H-band was finally studied.

Conclusions. We conclude that the prototype meet the SPHERE technical requirements for coronagraphy.

Key words. instrumentation : miscellaneous – methods : data analysis – atmospheric effects – stars : binaries : general

1. Introduction

Since 1995 and the discovery of the first extrasolar planet of a solar-type star by M. Mayor and D. Queloz (1995), direct detection and spectral characterization of an exoplanet has become one of the most exciting and challenging astronomical areas. In the context of second generation instruments for the Very Large Telescope (VLT), the European Southern Observatory (ESO) supported two phase A studies for a “planet finder” instrument. After the review of these two studies, an unique instrument called SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) is now considered for a first light in 2010.

SPHERE (Beuzit et al. 2006) is designed and built by a consortium of French, German, Italian, Swiss and Dutch institutes in collaboration with ESO. The project is currently in its phase B. The main goal of SPHERE is the direct detection of faint objects very close to a bright star, especially giant extrasolar planets. Other science studies concern brown dwarfs, circumstellar disks and related phenomena such as mass loss mechanisms, stellar winds or planetary nebulae. The design of the SPHERE instrument is divided into four subsystems : the Common Path Optics and three science channels, a differential imaging camera (IRDIS), an Integral Field Spectrograph (IFS), and a visible imaging polarimeter (ZIMPOL).

Table 1 summarizes the technical specifications for the coronagraphic mode of the instrument.

Specifications	
F/number	40
Full spectral coverage	YJHKs 0.95 μ m - 2.32 μ m
Simultaneous spectral coverage	YJH 0.95 μ m - 1.8 μ m
Field of view (FOV)	12.5'' \times 12.5''
PSF peak attenuation	> 100 at J-, H-bands (goal 400) 50 at Y-band (goal 200)
Gain in PSF Contrast	5 – 10 at J-, H-bands 2 at Y-band
Inner Working Angle	< 0.1''
Off-axis transmission	0.2 at 0.1'' (goal 0.5)
(including Lyot stop)	0.4 at 0.5'' (goal 0.7)

Table 1. SPHERE technical specifications for the coronagraphic mode.

In the consortium, Fizeau is in charge of the study and of the development of an Apodized Lyot Coronagraph (ALC). In the instrument design, the ALC will be a part of the Common Path Optics subsystem of SPHERE.

The purpose of this paper is twofold.

After having briefly recalled the principle of the Apodized Lyot Coronagraph in section 2, we describe in section 3 the experimental setup of the coronagraphic testbed we used to test the ALC, the IR coronagraphic bench of the Laboratoire d’Etudes Spatiales et d’Instrumentation en Astrophysique (LESIA) of the

Paris Observatory. Section 4 deals with the detailed characteristics of the three main components of the ALC tested prototype (apodizer, coronagraphic mask and Lyot stop).

Then, we present in section 5 the laboratory tests of the ALC prototype. They concern measurements of the apodizer transmission profile and of the ALC coronagraphic performances in Y-, J- and H-bands, and also the study of the ALC sensitivity to lateral and longitudinal misalignment of its components in H-band.

2. Principle of the Apodized Lyot Coronagraph

Preliminary. Firstly, Bernard Lyot introduced in 1930 the principle of the Classical Lyot Coronagraph (Lyot 1930) : an occulting disk, the Lyot coronagraphic mask, is placed in the telescope focal plane so as to block the central part of the diffraction pattern of the sun. In the relayed pupil plane, a diaphragm called Lyot stop is placed in order to remove the light diffracted by the coronagraphic mask out of the geometrical image of the pupil. The smaller the size of this Lyot stop, the better the light attenuation, but also the lower the throughput. Unfortunately, the contrast achieved by the Classical Lyot Coronagraph is not sufficient enough to image an exoplanet at the level of 10^{-6} flux contrast.

Principle. In this context, Soummer et al. (2003) proposed a dramatic improvement with the principle of the Prolate Apodized Lyot Coronagraph. In Fig. 1, we present the principle of the Apodized Lyot Coronagraph (ALC) adapted to our study, ie the ALC designed for SPHERE.

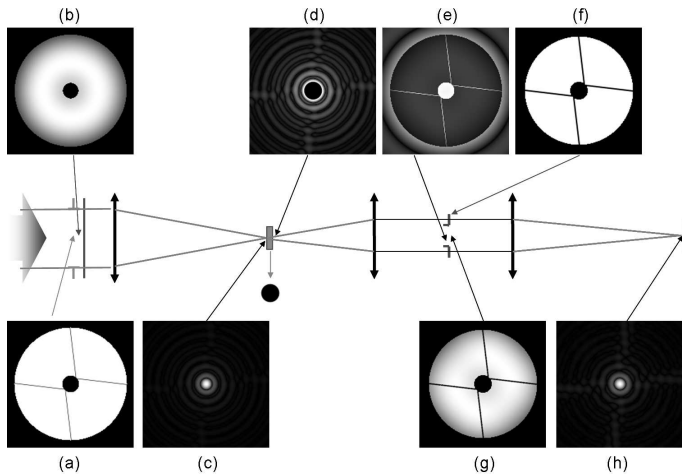


Fig. 1. Principle of SPHERE Apodized Lyot Coronagraph : (a) Entrance pupil, (b) Apodizer, (c) Point spread function (PSF) at the focus of the telescope, (d) PSF when the Lyot occulting coronagraphic mask is settled, (e) Pupil image before the Lyot stop introduction, (f) Lyot stop, (g) Pupil image with the Lyot stop, (h) Final coronagraphic PSF (the color scale has been enhanced for better visibility).

In this figure, we can see that, because the VLT entrance pupil is not a simple circular aperture and has a central obscuration and 4 spiders, the apodizer transmission function has a bagel shape (Soummer 2005, Carbillet et al. 2008). Furthermore, the best coronagraphic performance is obtained, in the theory, when the Lyot stop has the same shape as the entrance pupil one.

Overview of apodizer manufacturing techniques. Apodizing masks are commonly used in optics for 20 years, for instance

for laser beam shaping. However, the shape of the transmission profiles and the tolerance bounds are totally different and less constraining than those needed to perform astronomical high dynamic range imaging. That's why, one of the ALC critical realization point is the manufacturing of the apodizer. Several worldwide institutes are currently testing various apodization techniques : we can cite for instance thin layer deposition, ion implantation, HEBSTM glass (Canyon Materials and Soummer et al. 2006) or use of a Mach-Zehnder interferometer (Carloti et al. 2007). The main challenge is to obtain an apodizer that meets as much as possible the strong specifications and who introduces the lowest wavefront errors.

3. Experimental setup of the IR bench

Figure 3 shows the optical setup of the LESIA InfraRed (IR) bench (Boccaletti et al. 2007). This bench was designed to

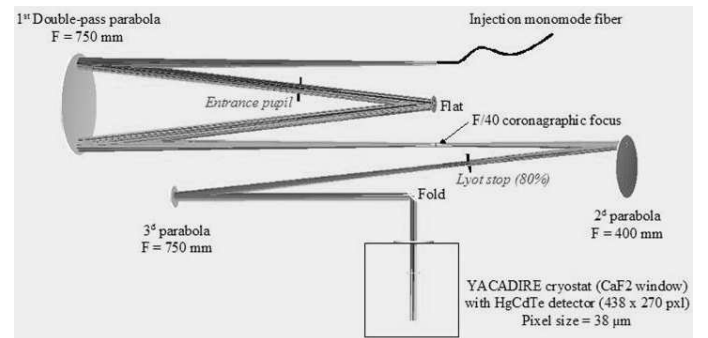


Fig. 2. Optical setup of the LESIA IR bench (Boccaletti et al. 2007).

test the coronagraph prototypes which will be mounted on the SPHERE instrument: the Half Wave - Four Quadrant Phase Mask (HW-4QPM) developed by the LESIA and the Apodized Lyot Coronagraph (ALC) we are currently developing. This bench mimics the optical conditions of SPHERE : the aperture ratio is F/40 which leads to an entrance pupil diameter of 18 mm. The optical design is achromatic and very astigmatic owing to an all reflective assembly based on off-axis parabola.

The available artificial light source is a polychromatic pig-tailed source delivering a large flat spectrum from visible to near-IR. A photonic crystal fiber is coupled to a super-continuum laser source. The output radiation is monomode from $0.45 \mu\text{m}$ to $2.5 \mu\text{m}$ with a mean optical power of 1 mW/nm.

In addition, several spectral filters are available on the bench. Table 2 gives their characteristics.

Band	Central λ (μm)	FWHM value (nm)	Transmission (%)
Y	1.063	52 (R=20)	88
J	1.191	41 (R=30)	85
H	1.68	240 (R=7)	55

Table 2. Spectral filters characteristics. FWHM stands for Full Width at Half-Maximum.

Finally, the detector is the same that this used for the tests of VIRTIS, the Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer on board Venus Express (Drossart et al. 2004). It's an array of 438×270 HgCdTe photodiodes, cooled by a cryostat. The characteristics of the detector are given in table 3.

Specifications	
Detector type	Photodiode HgCdTe
Number of pixels	438 x 270 pixels
Pixel size	38 μm
Operating Temperature	65 to 90 K
Spectral range	0.95 μm - 5 μm (at 70 K)
Saturation charge	2 10^6 e-
QE (for 6.10^7 to 2.10^{11} photons/s)	$\geq 50\%$
Mean obscurity current at 70 K	≤ 10 fA
Max obscurity current at 70 K	≤ 20 fA
Readout Noise (RMS)	≤ 632 e-
Establishment time at 0.01%	≤ 5 μs

Table 3. Main characteristics of the LESIA IR bench detector (Ghomchi 2001); QE stands for Quantum efficiency.

4. Characteristics of the ALC components

Simulations (Carbillet et al. 2008, Boccaletti et al. 2007) allowed to define some dimensioning and tolerancing on the optical elements that are given below.

4.1. The apodizer

4.1.1. Manufacturing characteristics

A prototype apodizer was purchased during phase B of the SPHERE project in order to confirm the feasibility of this component and to measure its coronagraphic performance on a test bench. The manufacturing process of this apodizer consists in a thin layer evaporation of InconelTM 600 on a CaF_2 glass substrate. InconelTM 600, commonly used by optical industries to manufacture neutral densities, has two advantages: a quite low reflectivity coefficient and a flat spectral transmission in visible and near-IR wavelengths. The apodizer was manufactured by Reynard Corp. in California.

Characteristics	
Spectral Range	950-2320 nm
Size	
OD of the Inconel layer	19.8 ± 0.1 mm
ID of the Inconel layer	1.0 ± 0.05 mm
Profile	
Circular symmetry	$\pm 5\%$
Transmission	See Fig. 3
Outside diameter of the substrate	30 ± 0.1 mm
Thickness of the substrate	4 ± 0.1 mm
Scratch/dig	10/5
Optical surface quality	$\lambda/10$ PTV @ 633 nm
Parallelism	< 5 arcsec
Material	CaF_2
Coating material	Inconel 600
Anti-reflection coating	$R < 1\%$ for 950-2320 nm

Table 4. Manufacturing characteristics of the apodizer. OD: Outer Diameter ; ID: Inner Diameter.

Table 4 gives the manufacturing characteristics of this apodizer. Figure 3 shows the required transmission profile with upper and lower tolerances, as given to the manufacturer. It also displays a picture of the apodizer. The transmission profile was measured by Reynard Corporation and confirmed by measurements on the optical bench (see Sect. 4.1.2).

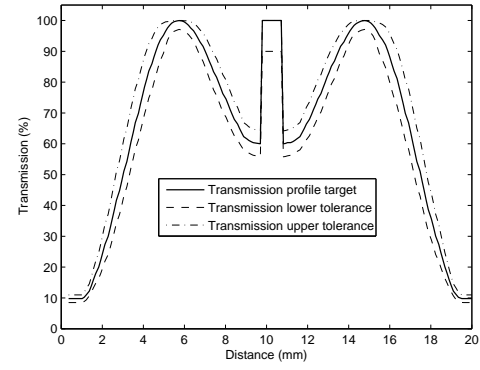


Fig. 3. Specification on the transmission profile of the apodizer. Note that the central transparent area of the apodizer was designed to be used during the alignment procedure, but has no effect on the performance during the observations as it corresponds to the telescope central obstruction. Right: picture of the apodizer.

4.1.2. Apodizer transmission measurement

Principle. The principle of the measurement is to acquire pupil images with and without apodizer, called respectively apodized and reference images. After a dark subtraction, a long exposure is generated for both pupil image types. Then, the apodized long exposure is divided by the reference one in order to avoid the inhomogenous illumination of the reference pupil. The radial transmission values of the apodizer are finally computed from this divided long exposure image.

Results. Figure 4 shows an example of a reference and an apodized long exposure pupil image obtained in H-band. Both long exposures are obtained by co-adding 50 snapshots of a 2-ms exposition time.

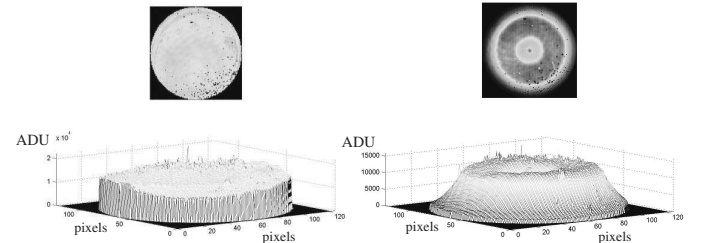


Fig. 4. 2D (top) and 3D (bottom) views of long exposures in H-band: (left) reference and (right) apodized images (Integration time = 2 ms; one pixel = 100 μm).

In the pupil images, we can note two main defects that are taken into account in the data processing: firstly, bad pixels of the detector are visible and we can also see in the 3-D images that the pupil is not perfectly uniformly illuminated.

Figure 5 shows the radial mean profile of the divided image in Y-, J-, and H-bands, as measured on the optical bench and compared to the theoretical tolerances.

Conclusion. These transmission profile measurements fit quite well the measurements carried out by Reynard Corp. itself. However, the three profiles are out of the tolerance limits between radius 2.5 mm and radius 4 mm. Furthermore, the Y-band

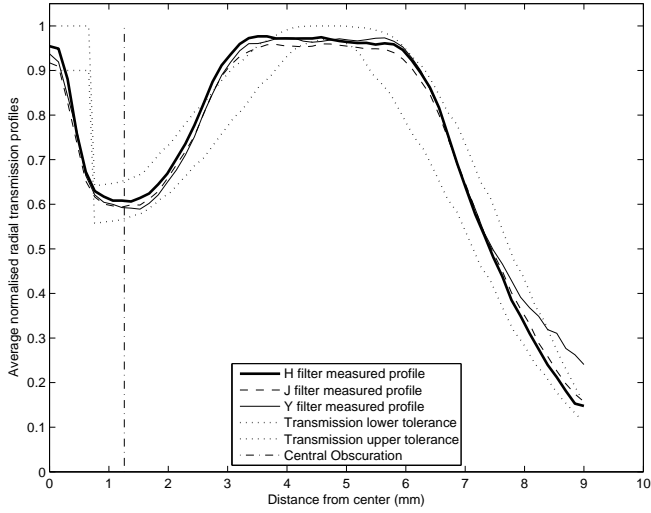


Fig. 5. Transmission profiles of the apodizer in Y-, J-, and H-bands, compared to the tolerance bounds.

measurements also show that the transmission exceeds the upper limit close to the pupil edge. The transmission profile is quite constant from Y- to H-band, assessing so the achromatism of the Inconel coating. The global transmission coefficient value of the apodizer is $65\% \pm 3\%$ in J- and H- bands and $68\% \pm 3\%$ in Y-band.

Because of the non-respect of the tolerance limits between 2.5 and 4 mm, we found useful to study the effect of this discrepancy in operational conditions, i.e. on SPHERE in the presence of residual atmospheric and static aberrations. The results of the simulations will be presented in Sect. 4.5.

4.2. The pupil mask

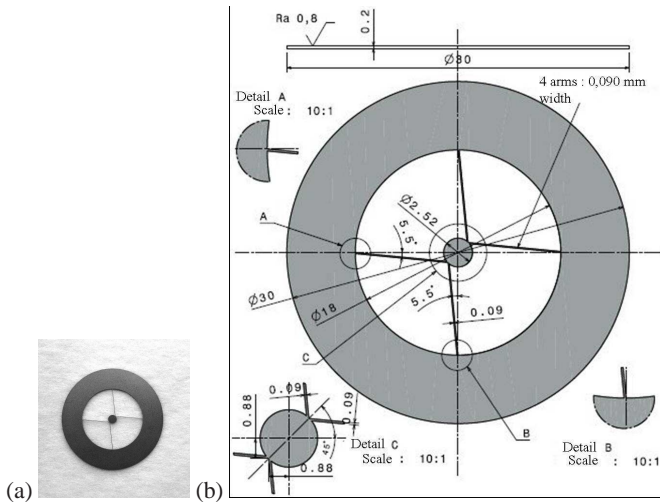


Fig. 6. Left: picture of the VLT pupil mask. Right: mechanical blueprint of this pupil mask.

Testing the APLC with an obscured entrance pupil was mandatory since the apodizer transmission profile is optimized with respect to the pupil geometry. The mask was laser-cut in

a stainless steel sheet (STEC, France). Its design simulates the exact VLT pupil at the scale 1/444, with an outer pupil diameter of 18 mm (see Fig. 6). Table 5 gives the main manufacturing tolerancing.

Technical specifications	
Centering of the 2 disks	$\pm 10 \mu\text{m}$
Outer diameter tolerancing	$\pm 20 \mu\text{m}$
Inner diameter tolerancing	$\pm 10 \mu\text{m}$
Arms straightness	$5 \mu\text{m}$

Table 5. Pupil mask specifications

This entrance pupil mask was set in the optical path at the same place as that of the theoretical entrance pupil.

4.3. The Lyot coronagraphic mask

The Lyot coronagraphic mask was manufactured by photolithography by the french company Micromodule. A chromium-coated opaque disk is deposited on a transparent silica substrate. Table 6 gives the manufacturing characteristics of this element.

Characteristics	
Mask diameter	$4\lambda/D = 267 \mu\text{m} @ 1.6 \mu\text{m}$
Mask diameter tolerancing	$\pm 1\%$
Mask optical density	light attenuation $> 10^6$
Substrate material	IR Silica
Substrate quality	$\lambda/4$ PTV @ 633 nm
Substrate parallelism	$< 1'$
Scratch/dig	10/5
Anti-Reflection coating	0.5%

Table 6. Manufacturing characteristics of the Lyot coronagraphic mask. D: pupil diameter.

Several masks of different diameters were set on the same substrate: presently only the $4\lambda/D @ 1.6 \mu\text{m}$ mask was used for these tests; Foucault knives were also set to make the alignment process more convenient.

4.4. The Lyot Stop

In the relayed pupil plane, the beam diameter is 10 mm on the test bench. According to Soummer (2005), the Lyot stop shape should be similar to the pupil mask one. The Lyot stop parameters were optimized by numerical simulations (Carillet et al. 2008; Beaulieu et Abe, LUAN internal report) and are the following:

- its outer diameter is 0.96 times the pupil image diameter, i.e. 9.6 mm,
- its central obscuration diameter is 1.05 times the pupil image central obscuration diameter,
- its arms width is 3 times the pupil image arms width, i.e. 0.150 mm.

The Lyot stop was manufactured like the pupil mask by a stainless steel sheet laser-cut (STEC, France). The manufacturing tolerancing is the same as the pupil mask one.

4.5. Simulations of the real apodizer prototype performances on the SPHERE instrument compared with the theoretical ones

Simulations were carried out to evaluate the Reynard apodizer performance with respect to the performance of the theoretical ideal apodizer. They were performed using the same simulation tool as in paper I (Carillet et al. 2008). The results for SPHERE main observing mode in the H_2H_3 bands are presented in Fig 7. In this simulation, atmospheric residuals and static aberrations are taken into account with the default setting parameters.

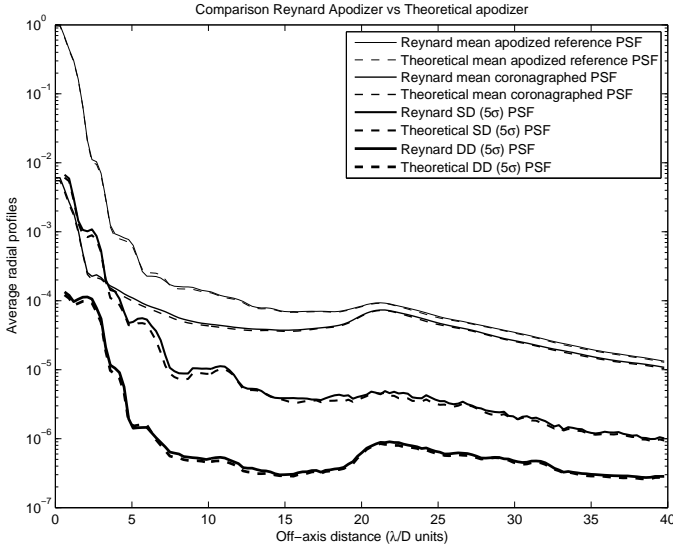


Fig. 7. Comparison of the ALC performances on the SPHERE instrument with the theoretical apodizer and with the manufactured apodizer with atmospheric residuals and static aberrations. SD=Single Difference, DD=Double Difference.

In this figure, Reynard's and theoretical apodizer coronagraphic PSFs are nearly superimposed. A similar analysis using the same settings for the simulations shows that Single Difference and Double Difference are nearly identical when comparing the Reynard apodizer curve with the theoretical one. It therefore implies that the profiles discrepancies measured in Fig. 5 have few influence on the ALC coronagraphic performances.

5. Laboratory tests of the ALC performances

The tests performed on the LESIA IR bench had several purposes :

- To measure the transmission profiles of the $4\lambda/D$ apodizer prototype manufactured by Reynard, at different wavelengths in Y-, J-, H-band (see Sect. 4.1.2).
- To measure the coronagraphic performances of the apodized Lyot coronagraph in Y-, J-, and H-band with this apodizer prototype and a $4\lambda/D$ mask.
- To study the sensitivity to lateral and longitudinal (defocus) misalignments of the three components of the ALC : apodizer, coronagraphic mask and Lyot stop.

All these tests were made using the Fianium super continuum source, with polychromatic filters in Y-, J-, and H-band.

They were carried out with the same Lyot coronagraphic mask, of a dimension of $4\lambda/D$ @ $1.6 \mu\text{m}$, i.e. $267 \mu\text{m}$.

5.1. Coronagraphic performance in Y-, J-, and H-bands

SPHERE requirements for coronagraphy

Several requirements are defined for the coronagraphs of SPHERE in terms of performance and in terms of technical specifications. Table 7 summarizes these requirements.

Requirements	
PSF peak attenuation	> 100 at J-, H-bands (goal 400) 50 at Y-band (goal 200)
Gain in PSF Contrast	5 – 10 at J-, H-bands 2 at Y-band
Inner Working Angle	< 0.1''
Off-axis transmission (including Lyot stop)	0.2 at 0.1'' (goal 0.5) 0.4 at 0.5'' (goal 0.7)

Table 7. SPHERE requirements for coronagraphy.

The PSF peak attenuation is the ratio between the PSF maximum of the non-coronagraphic image and the PSF maximum of the coronagraphic image. The gain in PSF contrast corresponds to the ratio of the average intensity levels of the PSF wings for the non-coronagraphic image and the coronagraphic image. The Inner Working Angle (IWA) is the minimal angular distance at which the throughput of an off-axis object is equal to half of the maximal throughput. The off-axis transmission is equivalent to the coronagraph throughput. Besides, we computed in the following the rejection ratio that is the ratio between the flux of the non-coronagraphic image and the one of the coronagraphic image.

Measurement principle

Acquisitions are done in the final coronagraphic focal plane. Three different Point Spread Functions (PSF) are successively recorded : the reference one, the reference apodized one and the coronagraphic one. Thirty short exposures (with dark subtraction) are co-added to obtain the long exposure. The measurement uncertainty is evaluated on each set of thirty short exposures by determining the error on the intensity fluctuations of each pixel.

To test the ALC dependency on wavelength, exactly the same components were used for each spectral band : only the spectral filter placed in front of the detector is changed (we remind that the spectral filters characteristics are given in Table 2). This also allows to evaluate the ALC performances in the case of simultaneous observations in two different spectral bands which will be the main observational mode of SPHERE.

Note that for the obtention of the reference PSFs, we used the same optimal configurations as those for the HW-4QPM tests inheriting the previous experience.

Measurement in H-band

Figure 8 shows the measurements in H-band of the reference non apodized PSF (integration time $T_i = 1 \text{ ms}$), the Reynard apodized PSF ($T_i = 1.5 \text{ ms}$) and the coronagraphed PSF ($T_i = 300 \text{ ms}$), compared with simulations. The latter takes into account the real transmission profile of the Reynard apodizer, as measured in Sect. 4.1.2 and the other relevant parameters are : no atmospheric residuals, no aberrations and broadband imaging in H-, J-, Y-band respectively. For the 2D-images, the color scale was modified to enhance contrast and visibility. The effect of

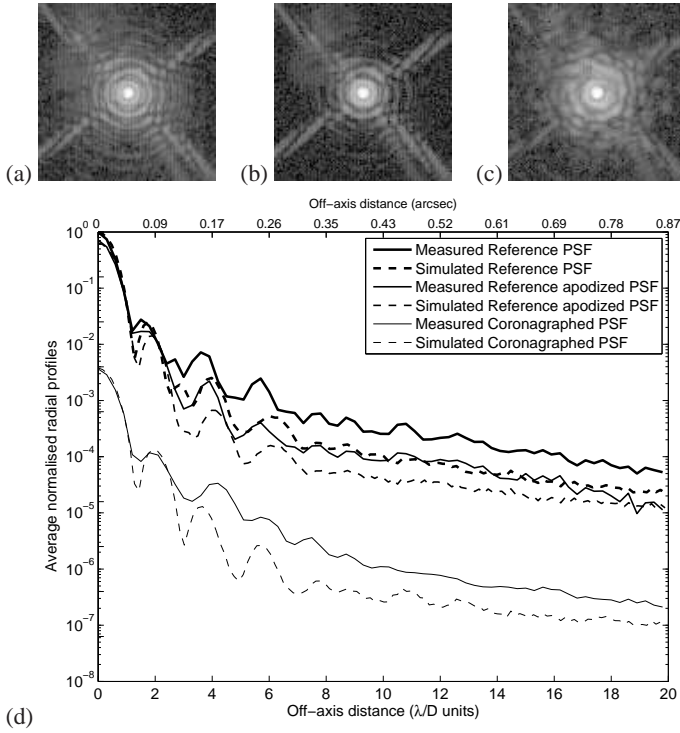


Fig. 8. Laboratory measurement in H-band : (a) Reference non apodized PSF, (b) Reference apodized PSF (dynamics x2), (c) Coronagraphed PSF (dynamics x300) and (d) Average radial profiles compared with simulations.

the apodizer is clearly visible through the shift of the Airy rings between the reference PSF and the apodized PSF. For off-axis distances greater than $2\lambda/D$, there is an offset in intensity between experimental results and simulations for both types of reference PSF. This discrepancy, also present in the HW-4QPM data, is likely due to residual chromatic aberrations of the coronagraphic bench which are not taken into account in the simulations. For example, a rectilinear ghost, parallel to the spider, is present at the bottom right. The discrepancy is present on both reference PSFs and is of a lesser importance on the coronagraphic PSF. Furthermore, we can see on 2D images that the PSFs are not radially symmetrical: for a given off-axis distance, the intensity levels on the radial profiles are locally affected. Anyway, we can qualitatively note from Fig. 8 that the PSF-wings contrast measured with the Reynard apodizer seems to comply with our expectations.

Criterion	Experimental value	Theoretical value
Peak attenuation (from the reference PSF)	270 ± 10	250 ± 30
Peak attenuation (from the apodized reference PSF)	190 ± 10	150 ± 20
Rejection ratio (from the reference PSF)	200 ± 40	205 ± 25
Rejection ratio (from the apodized reference PSF)	140 ± 30	135 ± 20

Table 8. ALC performances in H-band : comparison between experiment and simulation.

For a quantitative analysis, Table 8 gives the ALC coronagraphic performances deduced from these measurements com-

pared with simulations: they agree with expectations. The peak attenuation and the rejection values are respectively obtained with a dispersion of $\pm 3\%$ and $\pm 20\%$ on the thirty snapshots images. The rejection value presents a higher dispersion than the peak attenuation as its estimation takes into account a higher number of pixels. The uncertainties given on the theoretical values take into account that the coronagraphic mask was manufactured with a tolerance of $\pm 1\%$ on its diameter value.

Measurement in J-band

The same coronagraphic mask is used in J-band as in H-band. Therefore, the entrance PSF is obstructed by a larger Lyot mask with an equivalent diameter in J-band of $5.55\lambda/D$.

Figure 9 shows the measurements in J-band of the reference non apodized PSF (integration time $T_i = 1$ ms), the apodized reference PSF ($T_i = 1.5$ ms) and the coronagraphed PSF ($T_i = 850$ ms), compared with simulations.

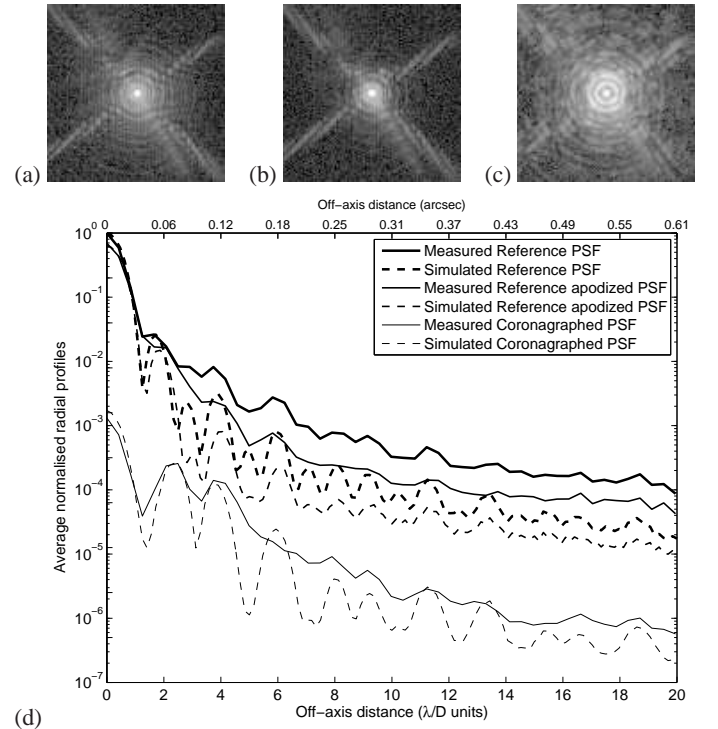


Fig. 9. Laboratory measurement in J-band : (a) Reference non apodized PSF, (b) Reference apodized PSF (dynamics x2), (c) Coronagraphed PSF (dynamics x850) and (d) Average radial profiles compared with simulations.

There is the same discrepancy between reference measured curves and simulated ones as in H-band. Also, the wings contrasts are more altered by the background residuals and optical aberrations. Let's note that the two spiders located at the upper left and the lower right are divided in two due to a ghost image. Nevertheless, the global behaviour of the PSF is consistent with the simulations.

The ALC nulling performances are given in Table 9. The rejection ratios are obtained with a dispersion of $\pm 20\%$.

The peak attenuation is not evaluated as we noted a discrepancy between the measured and the theoretical PSFs that could be generated by a defocus of the Lyot stop, introducing some residual diffraction at the center of the PSF.

Anyway, we are mainly interested by the ALC coronagraphic performances and Table 9 shows a good agreement between experimental and theoretical rejection ratios.

Criterion	Experimental value	Theoretical value
Rejection ratio (from the reference PSF)	190 ± 40	150 ± 5
Rejection ratio (from the apodized reference PSF)	120 ± 25	100 ± 5

Table 9. ALC performances in J-band : comparison between experiment and simulation.

Measurement in Y-band

In this configuration, the $4\lambda/D$ @ $1.6 \mu\text{m}$ has an equivalent diameter in Y-band of $6.2\lambda/D$.

Figure 10 shows the measurements in Y-band of the reference non apodized PSF (integration time $T_i = 1$ ms), the apodized reference PSF ($T_i = 1.5$ ms) and the coronagraphed PSF ($T_i = 1000$ ms), compared with simulations.

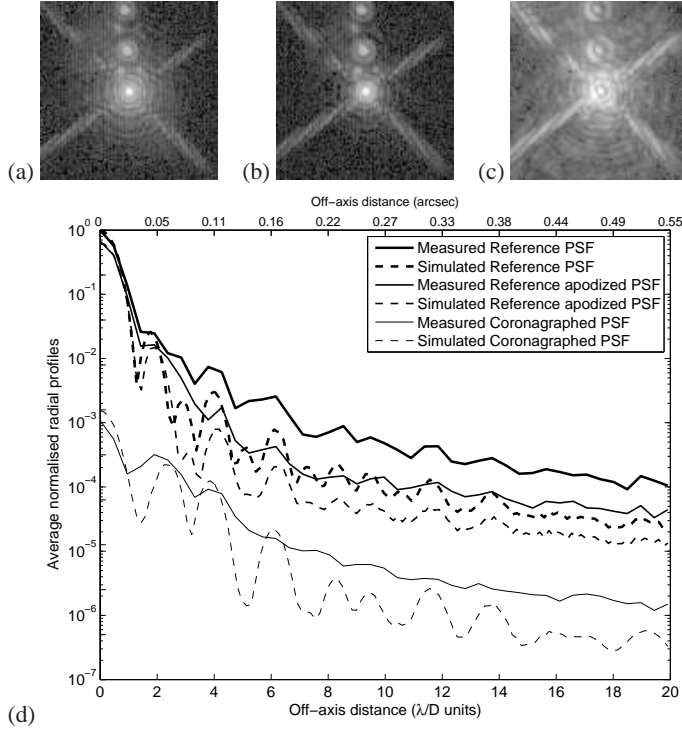


Fig. 10. Laboratory measurement in Y-band: (a) Reference non apodized PSF, (b) Reference apodized PSF (dynamics x2), (c) Coronagraphed PSF (dynamics x1000) and (d) Average radial profiles compared with simulations.

On all 2D-images, we can clearly see the presence of several ghost images. These ghosts are introduced by multiple reflections between the Y-spectral filter and the detector window.

Besides, like in J-Band, the ALC coronagraphic rejection ratios given in Table 10 are in good agreement. These values are obtained with a dispersion of $\pm 20\%$.

Determination of the Inner Working Angle (IWA) value

Criterion	Experimental value	Theoretical value
Rejection ratio (from the reference PSF)	180 ± 35	160 ± 5
Rejection ratio (from the apodized reference PSF)	110 ± 25	110 ± 5

Table 10. ALC performances in Y-band : comparison between experiment and simulation.

Another relevant measurement which is relative to the coronagraphic mask lateral misalignment is the determination of the Inner Working Angle value. The procedure to simulate an off-axis star consists in clearly decentering the coronagraphic mask. Figure 11 presents the evolution of the resulting coronagraphed PSFs for several values of the coronagraphic mask displacements.

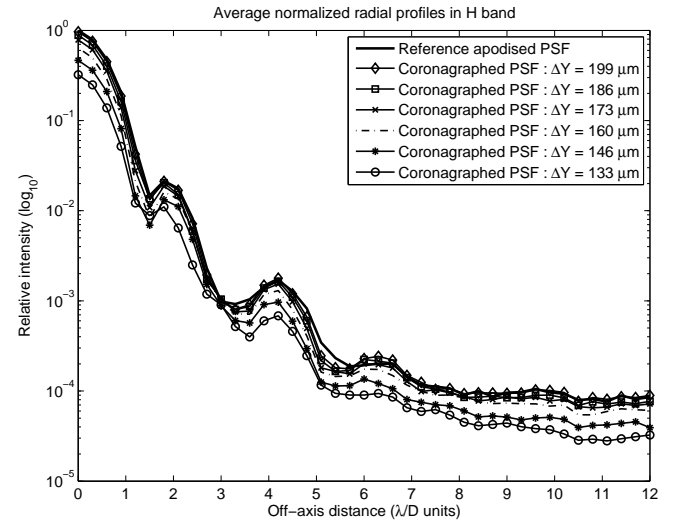


Fig. 11. Measurement to simulate an off-axis star to determine the inner working angle value. Top curve : apodized reference PSF. Bottom curves : coronagraphed PSF for several displacements ΔY of the coronagraphic mask, from $133 \mu\text{m}$ to $199 \mu\text{m}$.

As explained before, the IWA value is obtained when the star off-axis transmission is greater than 50%. Figure 12 shows the evolution of the off-axis star transmission as a function of the lateral displacement value.

The IWA value is obtained for a displacement value equal to 1.15 times the coronagraphic mask radius, ie $153 \mu\text{m}$ which corresponds to $2.29 \lambda/D$. This value is clearly consistent with our expectations extrapolated from the simulations made by Guyon et al. (2006).

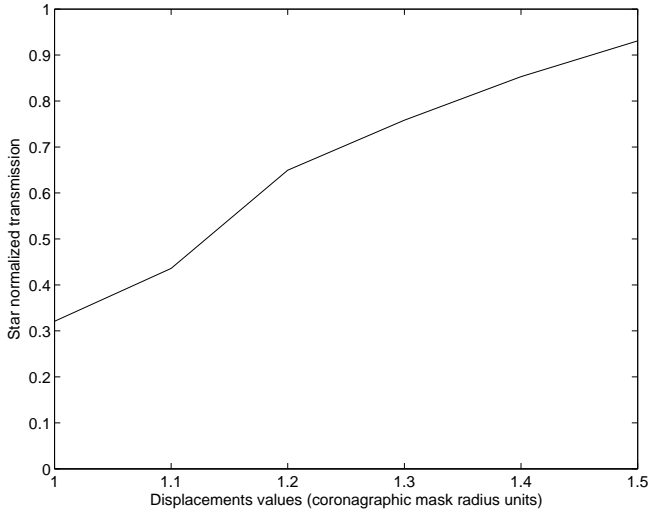


Fig. 12. Determination of the IWA : evolution of the off-axis star transmission versus the lateral displacement value.

Conclusion about the performances

Table 11 summarizes the ALC performances obtained in laboratory. Note that the off-axis transmission corresponds to the product of the apodizer global transmission by the Lyot stop transmission.

	Y Band	J Band	H Band
PSF peak attenuation	930	830	270
Gain in PSF contrast	20	21	24
Off-axis transmission	61.2%	58.5%	58.5%
Inner Working Angle	-	-	$2.29\lambda/D$

Table 11. Overview of the ALC performances

Despite the technical imperfections mentioned in the previous sections, the measured ALC performances meet the SPHERE requirements for coronagraphy given in Table 7. Further investigations are presently carried out to improve the image quality on the test bench especially to resolve the ghost problems. Furthermore, measured rejection ratios are in good agreement with the expectations.

5.2. Lateral misalignment sensitivity in H-band

In this section, the 3 main components of the ALC, the apodizer, the coronagraphic mask, and the Lyot stop, are successively laterally misaligned from their ideal position.

In order to determine the specifications on the lateral positioning of the ALC components, several coronagraphic metrics were used in addition to the evolution of the PSFs shapes which is a subjective criterion. We plotted the evolution of the peak attenuation and the rejection ratios as a function of the displacement value: an example concerning the apodizer lateral misalignment is given on Figure 13 and will be discussed in the following. For each misalignment value, we also determined the contrast evolution, ie the ratio between the average radial profile of the coronagraphed PSF with the displacement, and the average radial profile of the coronagraphed PSF for the ideal position: we look for the displacement value inducing a loss of contrast smaller than 10% that corresponds to the average level of noise.

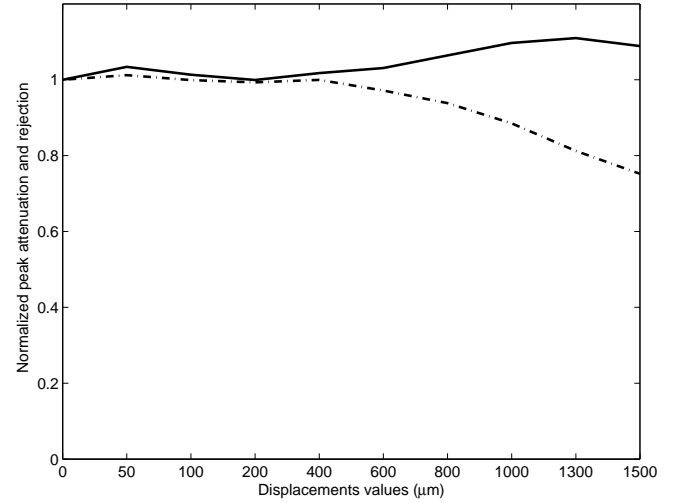


Fig. 13. Example of coronagraphic metrics used to determine the specifications on the positioning of the ALC components : evolution of the peak attenuation (solid) and rejection ratio (dash-dotted) as a function of the apodizer lateral displacement values ΔX , from 0 to 1.5 mm.

Sensitivity to the apodizer lateral misalignment

The apodizer is laterally shifted from its ideal position from 0 to 1.5 mm. Figure 14 shows the resulting coronagraphed PSFs.

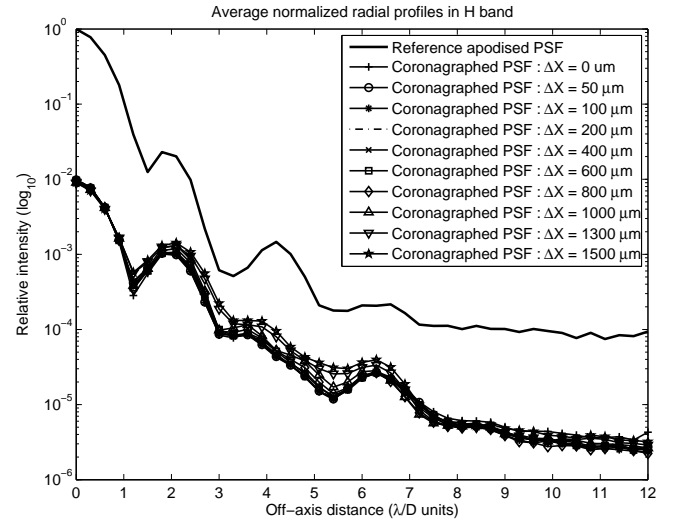


Fig. 14. Effect of the apodizer displacement along the lateral X-axis. Top curve: apodized reference PSF. Bottom curves: coronagraphed PSF for several apodizer displacements ΔX , from 0 to 1.5 mm.

The sensitivity of the ALC performances to the apodizer lateral misalignment is not severe : the PSF radial profiles curves are merged for displacement values below 400 μm . The displacement of 400 μm corresponds to a drift in the coronagraphic metrics, as seen in Fig. 13 and to a contrast loss exceeding 10%. This latter value is chosen for the tolerance and corresponds to $5 \cdot 10^{-3}$ times the radius of the apodizer. Furthermore, for values greater than 1300 μm , the sudden degradation of the PSF shapes and contrasts is due to the fact that the apodizer central transmis-

sion peak (used to make apodizer alignment more convenient) is no more occulted by the central obscuration of the pupil mask.

Sensitivity to the coronagraphic mask lateral misalignment

Figure 15 presents the evolution of the coronagraphed PSF while the Lyot coronagraphic mask is moved laterally along the Y-axis away from its supposed best position.

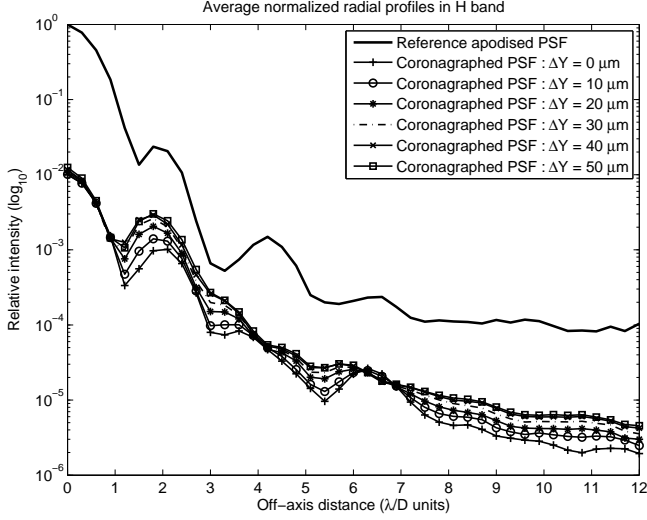


Fig. 15. Effect of the coronagraphic mask displacement along the lateral Y-axis. Top curve : apodized reference PSF. Bottom curves : coronagraphed PSF for several apodizer displacements ΔY , from 0 to 50 μm .

As expected, the ALC performances are very sensitive to the coronagraphic mask lateral misalignment: a 10 μm -displacement already induces important variations of the coronagraphed PSF shape, confirmed by the metrics. Therefore, the acceptable misalignment limit is lower than 10 μm : a tolerance value of few μm might be appropriate which is equivalent to few hundredths of the coronagraphic mask radius.

Sensitivity to the Lyot Stop lateral misalignment

The Lyot stop is laterally shifted from its ideal position from 0 to 150 μm . Figure 16 shows the resulting coronagraphed PSFs.

The ALC sensitivity to lateral misalignment on the Y-axis of the Lyot stop is quite important beyond $4 \lambda/D$. The tolerance value worths $\pm 40 \mu\text{m}$ which corresponds to 8 thousandths of the Lyot stop outer radius.

5.3. Defocus sensitivity in H-band

As it is difficult to simulate the Fresnel propagation of the light, we chose to estimate experimentally the ALC sensitivity to longitudinal misalignments of its components: the defocus of the apodizer, of the coronagraphic mask and of the Lyot stop. All measurements were done in H-band. The sensitivity values are evaluated using the same criteria and metrics as in section 5.2.

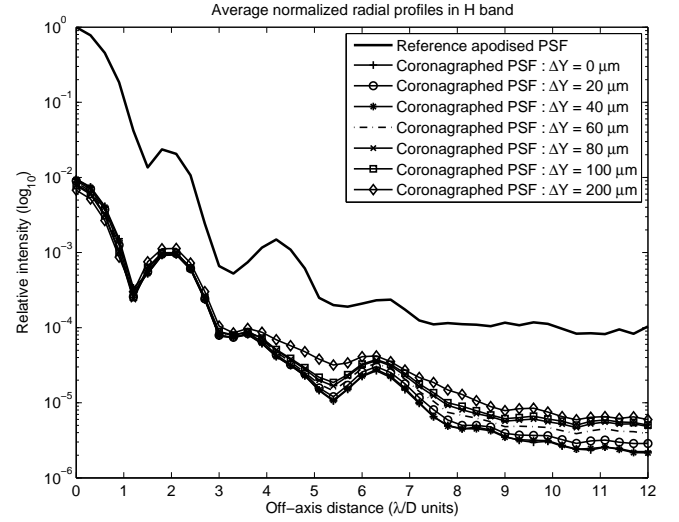


Fig. 16. Effect of the Lyot stop displacement along the lateral Y-axis. Top curve: apodized reference PSF. Bottom curves: coronagraphed PSF for several apodizer displacements ΔY , from 0 to 200 μm .

Sensitivity to the apodizer defocus

The apodizer was shifted along the longitudinal Z-axis, from 0 to 5 mm. The 0 mm position means that the apodizer is in the pupil plane, or as close as possible. Figure 17 shows the effect of the defocus of the apodizer on coronagraphed PSF for different displacements ΔZ . The relatively similar shape of all curves shows that the ALC is quite insensitive to apodizer defocus. A few mm of defocus lead to a loss of contrast in the coronagraphed PSF wings which increases with displacement: for example, a 1 mm defocus induces a change of the contrast from $0.6 \cdot 10^{-5}$ to $0.8 \cdot 10^{-5}$ at $8 \lambda/D$ from the PSF center.

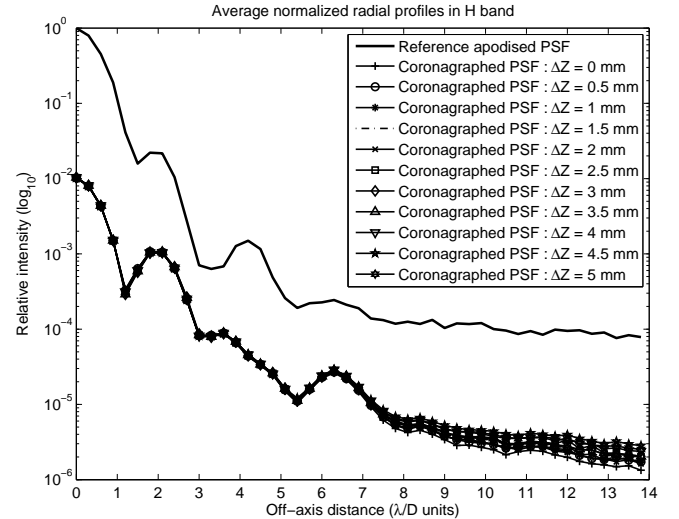


Fig. 17. Effect of the apodizer displacement along the longitudinal Z-axis. Top curve: apodized reference PSF. Bottom curves: coronagraphed PSF for several apodizer displacements ΔZ , from 0 to 5 mm.

A longitudinal Z positioning specification for the apodizer can be established to be $\pm 2.5 \text{ mm}$.

Sensitivity to the coronagraphic mask defocus

Figure 18 presents the evolution of the coronagraphed PSF while the Lyot coronagraphic mask is moved along the optical axis away from the supposed best focus position.

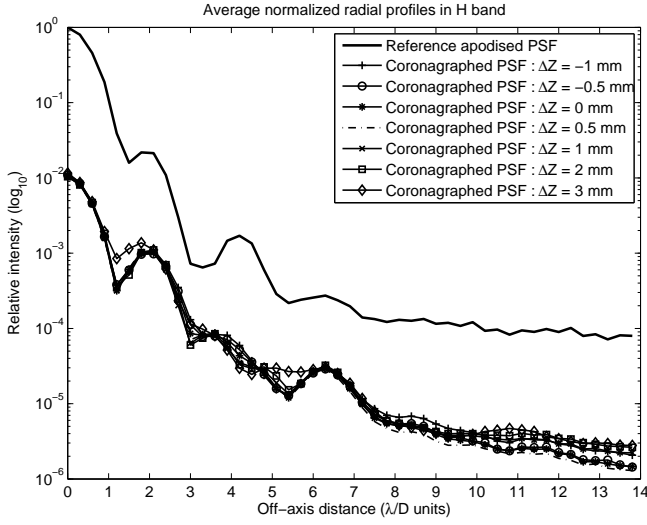


Fig. 18. Effect of the Lyot mask displacement along the longitudinal Z-axis. Top curve: apodized reference PSF. Bottom curves: coronagraphed PSF for several coronagraphic mask displacements ΔZ , from -1 to 3 mm from the supposed best focus position.

The displacement, from -1 mm to 3 mm, is not symmetrical due to a mechanical stop.

From this measurement, we can set a longitudinal positioning specification of ± 1 mm for the coronagraphic mask which corresponds to the contrast specification. More accurate evaluations of this effect is expected on the final bench, on which measurement noise will be lower and mechanical displacement better controlled.

Sensitivity to the Lyot Stop defocus

The Lyot stop was shifted along the longitudinal Z axis, from -10 to 6 mm. The 0 mm-position was supposed to be the optimal Z-position of the Lyot stop. Figure 19 shows the effect of the mask defocus on coronagraphed PSF for different ΔZ . Each curve corresponds to one displacement from the 0 -position.

The best contrast is obtained for a displacement ΔZ of -2 mm. In fact, the field depth of the alignment tool allowing the Lyot stop adjustment in the pupil plane is too large to be accurate enough. This shows the importance to iteratively adjust the Lyot stop position from contrast estimations.

This test brings two interesting results :

- The effect of a few mm-defocus of the Lyot Stop is almost null at distances to the PSF center up to $4\lambda/D$.
- The sensitivity of the contrast becomes severe for defocus greater than 6 mm.

Besides, we can notice a leap in the PSF profiles shapes between the -6 mm and the -8 mm displacements : this is due to edge diffraction in the center of the coronagraphic pupil plane leading to reinjecting some energy in the final focal plane.

These results show that a longitudinal Z positioning specification of ± 4 mm is realistic for the Lyot stop.

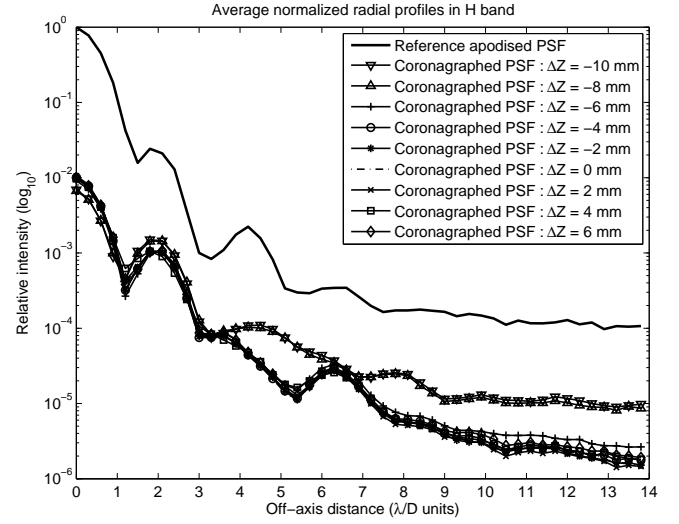


Fig. 19. Effect of the Lyot Stop displacement along the longitudinal Z-axis. Top curve: apodized reference PSF. Bottom curves: coronagraphed PSF for several Stop displacements ΔZ , from -10 to 6 mm from the supposed best focus position.

5.4. Conclusion on sensitivity in the H-band

Table 12 gives the specifications on absolute positioning for the three ALC components : apodizer, Lyot coronagraphic mask and Lyot stop. These specifications were deduced from the criteria and the metrics defined at the beginning of section 5.2.

	Lateral position	Longitudinal position
Apodizer	$\pm 500 \mu\text{m}$	$\pm 2.5 \text{ mm}$
Lyot coronagraphic mask	$\pm \text{few } \mu\text{m}$	$\pm 1 \text{ mm}$
Lyot stop	$\pm 40 \mu\text{m}$	$\pm 4 \text{ mm}$

Table 12. Synthesis of the tolerances values on the positioning of the ALC components obtained by measurements.

This leads to identify what the critical elements are for the mechanical positioning on the coronagraphic optical bench and for the direct imaging observational mode : the coronagraphic mask in both positions, and the Lyot stop in the lateral position.

Furthermore, we can notice that the same tendencies were found with another ALC prototype in the visible that were tested with the high dynamic range imaging bench at Fizeau laboratory (Guerri et al. 2008).

6. Conclusion

We have presented the results of the experimental characterization in the near-IR of the Apodized Lyot Coronagraph prototype that was designed for the SPHERE instrument. Several type of measurements were carried out, the main conclusions that can be drawn are :

- Apodizer characterization : the three transmission profiles in Y-, J-, and H-band, are out of the tolerance limits between radius 2.6 mm and radius 3.7 mm. The apodizer global transmission coefficient is $65\% \pm 3\%$ in J- and H- bands and $68\% \pm 3\%$ in Y-band, as expected.
- ALC coronagraphic performances in Y-, J-, and H-bands : the PSFs global look and the extinction ratio are consistent with the simulations.
- Estimation of the ALC sensitivity to the lateral and longitudinal misalignment of its three main components : the coronagraph is very sensitive to lateral displacements of the coronagraphic mask and of the Lyot stop, and to the Lyot stop defocus.

We can finally conclude that the prototype meets the technical requirements for coronagraphy, and we expect that the APLC instrument will comply the final SPHERE instrument specifications.

Acknowledgements. The experiments reported in this article were supported by the district of Provence Alpes Côte d’Azur (PACA), CNRS and the Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA). G. Guerri is grateful to CNRS, the PACA district and Sud-Est Optique de Précision (France) for supporting her PhD thesis.

References

- Aime, C., Soummer, R., & Ferrari, A., 2001, A&A, 379, 697
 Aime, C., Soummer, R., & Lopez, B., 2001, A&A, 370, 680
 Aime, C., Soummer, R. & Ferrari, A., 2002, A&A, 389, 334
 Aime, C. & Soummer, R., 2004, ApJ, 612, L85
 Beuzit, J.-L., Feldt, M., Dohlen, K. et al., 2006, The Messenger, 125, 29
 Boccaletti, A., Daban, J.-B., 2007, SPHERE - Coronagraph Test Report, VLT-TRE-SPH-14690-228
 Boccaletti, A., Daban, J.-B., 2007, SPHERE - Coronagraph Design Report, VLT-TRE-SPH-14690-229
 Boccaletti, A., Carbillet, M., Fusco, T., Thalmann, C., 2007, SPHERE - Simulation tool manual for Software Package SPHERE v2.1, VLT-MAN-SPH-14690-230
 Carbillet, M., Bendjoya, P., Guerri, G. et al., A&A, 2008, submitted
 Carlotti, A., Ricort, G., Aime, C., Azhari, Y.E., Soummer, R., 2007, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 24C
 Drossart, P., Piccioni, G., Coradini, A., Reess, J.-M., Semery, A., Suetta, E., Cosi, M., Dami, M., Arnold, G., Peter, G., Henry, F., 2004, Proc. SPIE, 5543, 175
 Ghomchi, Y., 2001, PhD Thesis, Université Paris VI
 Guerri, G., Robbe-Dubois, S., Daban, J.B., Abe, L., Douet, L., Bendjoya, P., Vakili, F., Carbillet, M., 2008, Proc. SPIE
 Guyon, O., Pluzhnik, E. A., Kuchner, M. J., Collins, B., Ridgway, S. T., 2006, ApJS, 167, 81
 Lyot, B., 1930, C. R. Acad. Sci. Paris, 4860, 171
 Lyot, B., 1939, MNRAS, 4860, 171
 Mayor, M. & Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
 Neuhaüser, R., Mugrauer, M., Fukagawa, M., Torres, G. & Schmidt, T., 2007, A&A, 462, 777
 Soummer, R., Aime, C. and Falloon, P., 2003, A&A, 397, 1161
 Soummer, R., 2005, ApJ, **618**, L161
 Soummer, R., Sivaramakrishnan, A., Oppenheimer, B. R., Macintosh, B. A., 2006, BAAS, 38, 1110

Bibliographie

- [1] Abe, L., Boccaletti, A., & Vakili, F., 2001, *The achromatic phase knife coronagraph*, A&A, **374**, 1161
- [2] Abe, L., 2002, *Imagerie à Haute dynamique : Coronographie à Contraste de Phase et Détecteurs Spécifiques*, Thèse de Doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis (<http://www-astro.unice.fr/~abe/>, Publications section)
- [3] Abe, L., Domiciano de Souza Jr, A., Vakili, F. & Gay, J., 2003, *Phase Knife Coronagraph : II Laboratory results*, A&A, **400**, 385
- [4] Abe, L., Beaulieu, M., Vakili, F., Gay, J., Rivet, J.-P., Dervaux, S., Domiciano de Souza, A., 2007, *On-sky observations with an achromatic hybrid phase knife coronagraph in the visible (Research Note)*, A&A, **461**, 365
- [5] Agabi, A., Aristidi, E., Azouit, M., Fossat, E., Martin, F., Sadibekova, T., Vernin, J., Ziad, A., 2006, *First whole atmosphere night-time seeing measurements at Dome C, Antarctica*, PASP, **118**, 344
- [6] Aime, C., Soummer, R. & Ferrari, A., 2001, *Interferometric apodization of rectangular apertures - Application to stellar coronagraphy*, A&A, **379**, 697
- [7] Aime, C., Soummer, R. & Lopez, B., 2001, *Stellar coronagraphy with a redundant array of telescopes in space : The multiple mask coronagraph*, A&A, **370**, 680
- [8] Aime, C., Soummer, R. & Ferrari, A., 2002, *Total coronagraphic extinction of rectangular apertures using linear prolate apodizations*, A&A, **389**, 334
- [9] Aime, C. & Soummer, R., 2004, *The Usefulness and Limits of Coronagraphy in the Presence of Pinned Speckles*, ApJ, **612**, L85
- [10] Aime, C., 2005, *Principle of an Achromatic Prolate Apodized Lyot Coronagraph*, PASP, **117**, 1112
- [11] Albrow, M. D., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., Dominik, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Watson, R., Williams, A., Bond, H. E., van Bemmelen, I. M., 2000, *Detection of Rotation in a Binary Microlens : PLANET Photometry of MACHO 97-BLG-41*, ApJ, **534**, 894
- [12] Aristidi, E., Agabi, A., Vernin, J., Azouit, M., Martin, F., Ziad, A., Fossat, E., 2003, *Antarctic site testing : First daytime seeing monitoring at Dome C*, A&A, **406**, L19
- [13] Aristidi, E., Agabi, K., Azouit, M., Fossat, E., Vernin, J., Travouillon, T., Lawrence, J.S., Meyer, C., Storey, J.W.V., Halter, B., Roth, W.L., Walden, V., 2005a, *An analysis of temperatures and wind speeds above Dome C, Antarctica*, A&A, **430**, 739
- [14] Aristidi, E., Agabi, A., Fossat, E., Azouit, M., Martin, F., Sadibekova, T., Travouillon, T., Vernin, J., Ziad, A., 2005b, *Site testing in summer at Dome C, Antarctica*, A&A, **444**, 651

- [15] Baudoz, P., Rabbia, Y., Gay, J., 2000, *Achromatic Interfero Coronagraph : I. Theoretical capabilities for ground-based observations*, A&A Suppl. Ser., **141**, 319
- [16] Baudoz, P., Rabbia, Y., Gay, J., 2000, *Achromatic Interfero Coronagraph : II. Effective performance on the sky*, A&A Suppl. Ser., **145**, 341
- [17] Baudoz, P., Rabbia, Y., Gay, J., Beuzit, J.L., 2000, *First observation result with the compact achromatic interfero coronagraph*, Proc. SPIE, **4007**, 980B
- [18] Beckwith, S., Stiavelli, M., Koekemoer, A. M., Caldwell, J. A. R., Ferguson, H. C., Hook, R., Lucas, R. A., Bergeron, L. E., Corbin, M., Jogee, S., Panagia, N., Robberto, M., Royle, P., Somerville, R. S., Sosey, M., 2006, *The Hubble Ultra Deep Field*, AJ, **132**, 1729
- [19] Bennett, D. P., Rhie, S. H., Becker, A. C., Butler, N., Dann, J., Kaspi, S., Leibowitz, E. M., Lipkin, Y., Maoz, D., Mendelson, H., Peterson, B. A., Quinn, J., Shemmer, O., Thomson, S., Turner, S. E., 1999, *Discovery of a planet orbiting a binary star system from gravitational microlensing*, Nature, **402**, 57
- [20] Beaulieu, J.-P., Bennett, D. P., Fouqué, P., Williams, A., Dominik, M., Jorgensen, U. G., Kubas, D., Cassan, A., Coutures, C., Greenhill, J., Hill, K., Menzies, J., Sackett, P. D., Albrow, M., Brilliant, S., Caldwell, J. A. R., Calitz, J. J., Cook, K. H., Corrales, E., Desort, M., Dieters, S., Dominis, D., Donatowicz, J., Hoffman, M., Kane, S., Marquette, J.-B., Martin, R., Meintjes, P., Pollard, K., Sahu, K., Vinter, C., Wambsganss, J., Woller, K., Horne, K., Steele, I., Bramich, D. M., Burgdorf, M., Snodgrass, C., Bode, M., Udalski, A., Szymanski, M. K., Kubiak, M., Wiśniewski, T., Pietrzynski, G., Soszynski, I., Szewczyk, O., Wyrzykowski, L., Paczynski, B., Abe, F., Bond, I. A., Britton, T. R., Gilmore, A. C., Hearnshaw, J. B., Itow, Y., Kamiya, K., Kilmartin, P. M., Korpela, A. V., Masuda, K., Matsubara, Y., Motomura, M., Muraki, Y., Nakamura, S., Okada, C., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Sako, T., Sato, S., Sasaki, M., Sekiguchi, T., Sullivan, D. J., Tristram, P. J., Yock, P. C. M., Yoshioka, T., 2006, *Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing*, Nature, **439**, 437
- [21] Beuzit, J.-L., Feldt, M., Dohlen, K. et al., 2006, *SPHERE : a 'Planet Finder' Instrument for the VLT*, The Messenger, **125**, 29
- [22] Biller, B., Kasper, M., Close, L., Brandner, W., Kellner, S., 2006, *Discovery of a very nearby brown dwarf to the sun : A methane rich brown dwarf companion to the low mass star SCR 1845-6357*, ApJ, **641**, L141
- [23] Boccaletti, A., Rouan, D., Ragazzoni, R., 1998, *Preliminary results of dark-speckle stellar coronagraphy*, A&A, **338**, 106
- [24] Boccaletti, A., Riaud, P., Rouan, D., Baudrand, J., 2002, *Imaging Exoplanets with NGST/MIRI*, Proc. SF2A, 159
- [25] Boccaletti, A., Riaud, P., Baudoz, P., Baudrand, J., Rouan, D., Gratadour, D., Lacombe, F., Lagrange, A.-M., 2004, *The Four-Quadrant Phase Mask Coronagraph. IV. First Light at the Very Large Telescope*, PASP, **116**, 1061
- [26] Boccaletti, A., Daban, J.-B. et al., 2007, *SPHERE - Coronagraph Test Report*, VLT-TRE-SPH-14690-228
- [27] Boccaletti, A., Daban, J.-B. et al., 2007, *SPHERE - Coronagraph Design Report*, VLT-TRE-SPH-14690-229
- [28] Boccaletti, A., Carillet, M., Fusco, T., Thalmann, C., 2007, *SPHERE - Simulation tool manual for Software Package SPHERE v2.1*, VLT-MAN-SPH-14690-230

-
- [29] Born, M., Wolf, E., 1979, *Principles of Optics*, 7th edition, Cambridge University Press, 499
 - [30] Bracewell, R. N., 1978, *Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer*, Nature, **274**, 780
 - [31] Burrows, A., Sudarsky, D., Hubeny, I., 2004, *Spectra and Diagnostics for the Direct Detection of Wide-Separation Extrasolar Giant Planets*, ApJ, **609**, 407
 - [32] Carbillet, M., Vérinaud, C., Femenia, B., Riccardi, A., Fini, L., 2005, *Modelling astronomical adaptive optics - II. The software package CAOS*, MNRAS, **356**, 1263
 - [33] Carlotti, A., Ricort, G., Aime, C., Azhari, Y.E., Soummer, R., 2007, *Apodized Apertures Using a Mach-Zehnder Interferometer. Laboratory Results*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 24C
 - [34] Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M., 2000, *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star*, ApJ, **529**, L45
 - [35] Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., 2004, *A giant planet candidate near a young brown dwarf*, A&A, **425**, L29
 - [36] Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., 2005, *Giant Planet Companion to the brown dwarf 2MASSWJ1207334-393254*, A&A, **438**, L25
 - [37] Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Zuckerman, B., Dumas, C., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., Bessel, M.-S., 2005, *A companion to AB Pic at the planet/brown dwarf boundary*, A&A, **438**, L29
 - [38] Crepp, J. R., Ge, J., Vanden Heuvel, A. D., Miller, S. P., K., M. J., 2006, *Laboratory Testing of a Lyot Coronagraph Equipped with an Eighth-Order Notch Filter Image Mask*, ApJ, **646**, 1252
 - [39] Debes, J. H., Ge, J., 2004, *High-Contrast Imaging with Gaussian Aperture Pupil Masks*, PASP, **116**, 674
 - [40] Dohlen, K., 2006, *SPHERE - Global Ghost Analysis*, VLT-BBB-SPH-14690-GGGG
 - [41] Douet, R., Bendjoya, Ph., Daban, J.-B., Guerri, G., Robbe-Dubois, S., Carbillet, M., Gouvet, C., 2007, *SPHERE - ALC IR Ghost Report*, VLT-BBB-SPH-14690-GGGG
 - [42] Elhalkouj, T., Ziad, A., Petrov, R. G., Lazrek, M., Elazhari, Y., Benkhaldoun, Z., 2008, *Isopistonc angle for multi-aperture interferometers from isoplanatic angle*, A&A, **477**, 337
 - [43] Enya, K., Abe, L., Tanaka, S., Nakagawa, T., Tamura, M., Kataza, H., Guyon, O., The Spica Working Group, 2007, *The SPICA Coronagraph Project*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 35E
 - [44] Ford, V., Levine-West, M., Kissil, A., Kwack, E., Ho, T., Dumont, P., Lisman, D., Feher, P., Cafferty, T., 2006, *Terrestrial Planet Finder Coronagraph Observatory Summary*, Proc. IAUC200, Cambridge University Press, 335
 - [45] Fossat, E., 2005, *The Concordia Station on the Antarctic Plateau : The Best Site on Earth for the 21st Century Astronomers*, J. Astrophys. Astr., **26**, 349F
 - [46] Gay, J., Rabbia, Y., 1997, *Principe d'un coronographe interférentiel*, C. R. Acad. Sci. Paris, Série II, **322**, 265
 - [47] Gerchberg, R. W., Saxton, W. O., 1972, *A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures*, Optik, **35**, 227

- [48] Ghomchi, Y., 2001, *Caractérisation et étalonnage du détecteur infrarouge de l'instrument VIRTIS-H pour la mission cométaire Roseta*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI
- [49] Goodell, W. V., Coulter, J. K., Johnson, P. B., 1973, *Optical constants of Inconel alloy films*, J. Opt. Soc. Am., **63**, 185
- [50] Graham, J. R., Macintosh, B., Doyon, R., Gavel, D., Larkin, J., Levine, M., Oppenheimer, B., Palmer, D., Saddlemyer, L., Sivaramakrishnan, A., Veran, J.-P., Wallace, K., 2007, *Ground-Based Direct Detection of Exoplanets with the Gemini Planet Imager (GPI)*, White paper submitted to the NSF-NASA-DOE Astronomy and Astrophysics Advisory Committee ExoPlanet Task Force
- [51] Guerri, G., Daban, J.-B., Abe, L., Bendjoya, P., Vakili, F., Sarry, J., Auroux, S., 2005, *High dynamic range imaging experiments at LUAN : progress and future prospects*, Proc. SF2A, EDP Science Conf. Ser., 277
- [52] Guerri, G., Daban, J.-B., Vakili, F., Abe, L., Aristidi, E., Agabi, K., Bendjoya, P., Sarry, J., Schmider, F. X., Lopez, B., 2006, *CORONA : progress report on the Dome C prototype APKC coronagraph*, Proc. SPIE, **6269**, 62695D
- [53] Guillot, T., Showman, A. P., 2002, *Evolution of '51 Pegasus b-like' planets*, A&A, **385**, 156
- [54] Guyon, O., Roddier, C., Graves, J. E., Roddier, F., Cuevas, S., Espejo, C., Gonzalez, S., Martinez, A., Bisiacchi, G., Vuntsemeri, V., 1999, *The Nulling Stellar Coronagraph : Laboratory Tests and Performance Evaluation*, PASP, **111**, 1321
- [55] Guyon, O., Roddier, F., 2000, *Nulling stellar coronagraphic imaging using space interferometric arrays*, Proc. Conf. "Darwin and astronomy - the infrared space interferometer", ESA SP, **451**, 41
- [56] Guyon, O., 2003, *Phase-induced amplitude apodization of telescope pupils for extrasolar terrestrial planet imaging*, A&A, **404**, 379
- [57] Guyon, O., Pluzhnik, E. A., Kuchner, M. J., Collins, B., Ridgway, S. T., 2006, *Theoretical Limits on Extrasolar Terrestrial Planet Detection with Coronagraphs*, APJ Suppl, **167**, 81
- [58] Guyon, O., Angel, J. R. P., Bowers, C., Burge, J., Burrows, A., Codona, J. L., Greene, T., Iye, M., Kasting, J., Martin, H., McCarthy, D., Meadows, V., Meyer, M., Pluzhnik, E. A., Sleep, N., Spears, T., Tamura, M., Tenerelli, D., Vanderbei, R., Woodgate, B., Woodruff, R. A., Woolf, N., 2007, *Direct Imaging of Nearby Exoplanets with a Small Size Space Telescope : Telescope to Observe Planetary System (TOPS)*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 37G
- [59] Hodapp, K-W., Tamura, M., Suzuki, R., Jacobson, S., Stahlberger, V., Yamada, H., Takami, H., Guyon, O., Hashimoto, J., Abe, L., 2007, *HiCIAO - Subaru's New High-contrast Coronagraphic Imager For Adaptive Optics*, American Astronomical Society Meeting, **210**, 7803H
- [60] Joos, F., 2007, *Polarimetric direct detection of extra-solar planets with SPHERE/ZIMPOL*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 28J
- [61] Kasdin, N. J., Vanderbei, R. J., Spergel, D. N., Littman, M. G., 2003, *Extrasolar Planet Finding via Optimal Apodized-Pupil and Shaped-Pupil Coronagraphs*, **446**, 739L
- [62] Kasdin, N. J., Vanderbei, R. J., Littman, M. G., Spergel, D. N., 2005, *Optimal one-dimensional apodizations and shaped pupils for planet finding coronagraphy*, Applied Optics, vol. 44, **44**, 1117

-
- [63] Kasper, M., Verinaud, C., Beuzit, J.-L., Yaitskova, N., Hubin, N., Boccaletti, A., Dohlen, K., Fusco, T., Glindemann, A., Gratton, R., Thatte, N., 2007, *EPICS : A Planet Hunter for the European ELT*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 35K
 - [64] Kuchner, Marc J., Traub, Wesley A., 2002, *A Coronagraph with a Band-limited Mask for Finding Terrestrial Planets*, ApJ, **570**, 900
 - [65] Kuchner, M. J., 2004, *A unified View of Coronagraph Image Masks*, Submitted to ApJ
 - [66] Labeyrie, A., 1995, *Images of exo-planets obtainable from dark speckles in adaptive telescopes*, A&A, **298**, 544
 - [67] Law, N.M., Mackay, C.D., Baldwin, J.E., 2006, *Lucky imaging : high angular resolution imaging in the visible from the ground*, A&A, **446**, 739L
 - [68] Léger, A., Ollivier, M., Altwegg, K., Woolf, N. J., 1999, *Is the presence of H₂O and O₃ in an exoplanet a reliable signature of a biological activity?*, A&A, **341**, 304L
 - [69] Lloyd, J. P., Gavel, D. T., Graham, J. R. Hodge, P. E., Sivaramakrishnan, A., Voit, G. M., 2003, *Four Quadrant Phase Mask : Analytical Calculation and Pupil Geometry*, Proc. SPIE, **4860**, 171
 - [70] Lyot, B., 1939, *The study of the solar corona and prominences without eclipses*, MNRAS, **99**, 538
 - [71] Malbet, F., Yu, J., Shao, M., 1995, *High dynamic range imaging using a deformable mirror for space coronagraphy*, PASP, **107**, 386
 - [72] Malbet, F., 1996, *High angular resolution coronagraphy for adaptive optics*, A&A Suppl., **115**, 161
 - [73] Marois, C., Doyon, R., Racine, R., Nadeau, D., 2000, *Efficient Speckle Noise Attenuation in Faint Companion Imaging*, PASP, **112**, 91
 - [74] Martinez, P., Boccaletti, A., Kasper, M., Baudoz, P., Cavarroc, C., 2007, *Optimization of Apodized Pupil Lyot Coronagraph for ELTs*, A&A, **474**, 671
 - [75] Mayor, M. & Queloz, D., 1995, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, Nature, **378**, 355
 - [76] Mawet, D., Riaud, P., Absil, O., Surdej, J., 2005, *Annular Groove Phase Mask Coronagraph*, AJ, **633**, 1191
 - [77] Mawet, D., Riaud, P., Baudrand, J., Baudoz, P., Boccaletti, A., Dupuis, O., Rouan, D., 2006, *The four-quadrant phase-mask coronagraph : white light laboratory results with an achromatic device*, A&A, **448**, 801
 - [78] Mouillet, D., Beuzit, J.-L., Chauvin, G., Lagrange, A.-M., 2001, *Very accurate imaging of the close environment of bright objects in the visible and near-infrared*, ESO Proc. Scientific drivers for ESO future VLT/VLTI future instrumentation, 258
 - [79] Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., Golimowski, D. A., Matthews, K., Durrance, S. T., 1995, , Nature, **378**, 463
 - [80] Neuhaüser, R., Guenther, E., Wuchterl, G., Mugrauer, M., Bedalov, A., Hauschildt, P., 2005, *Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup*, A&A, **345**, L13
 - [81] Neuhaüser, R., Mugrauer, M., Fukagawa, M., Torres, G. & Schmidt, T., 2007, *Direct detection of exoplanet host star companion γ Cep B and revised masses for both stars and the sub-stellar object*, A&A, **462**, 777

- [82] Nisenson, P., Papaliolios, C., 2001, *Detection of Earth-like Planets Using Apodized Telescopes* **548**, L201
- [83] Petrov, R. G., Malbet, F., Richichi, A., Hofmann, K.-H., Mourard, D., Agabi, K., Antonelli, P., Aristidi, E., Baffa, C., Beckmann, U., Berio, P., Bresson, Y., Cassaing, F., 2000, *AMBER : the near-infrared focal instrument for the Very Large Telescope Interferometer*, SPIE, **4006**, 68
- [84] Racine, R., Walter, G. A. H., Nadeau, D., Doyon, R., Marois, C., 1999, *Speckle Noise and the Detection of Faint Companions*, PASP, **111**, 587
- [85] Rabbia, Y., Gay, J., Rivet, J.-P., 2007, *The Achromatic Interfero Coronagraph*, CRAS, **8**, 385
- [86] Refsdal, S., 1964, *The gravitational lens effect*, MNRAS, **128**, 295
- [87] Riaud, P., Boccaletti, A., Rouan, D., Lemarquis, F. & Labeyrie, A., 2001, *The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. II. Simulations*, PASP, **113**, 1145
- [88] Roberts, L. C., Neyman, C. R., 2002, *Characterization of the AEOS Adaptive Optics System*, PASP, **114**, 1260
- [89] Roddier, F. & Roddier, C., 1997, *Stellar Coronagraph with Phase Mask*, PASP, **109**, 815
- [90] Rouan, D., Riaud, P., Boccaletti, A., Clénet, Y. & Labeyrie, A., 2000, *The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle*, PASP, **112**, 1479
- [91] Rouan, D., Boccaletti, A., Baudoz, P., Cavarroc, C., Baudrand, J., Reess, J. M., 2007, *The Coronagraphic Mode of MIRI/JWST*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot, 35R
- [92] Serabyn, E., Wallace, J. K., Troy, M., Mennesson, B., Haguenaue, P., Gappinger, R. O., Bloemhof, E. E., 2006, *Extreme adaptive optics imaging with a clear and well-corrected off-axis telescope sub-aperture*, Proc. SPIE, **6272**, 62722W
- [93] Sivaramakrishnan, A., Oppenheimer, B. R., Soummer, R., Hinkley, S., Brenner, D., Lecomte, J., Roberts, L. C., Perrin, M. D., Lloyd, J. P., Makidon, R. B., Kuhn, J. R., 2007, *The Lyot Project : Status and Results*, Proc. of the conference In the Spirit of Bernard Lyot June 04 - 08, 2007, 21S
- [94] Slepian, D. & Pollak, H., O., 1961, *Prolate spheroidal wavefunctions, Fourier analysis, and uncertainty -I*, Bell Syst. Tech. J., **40**, 43
- [95] Smith, B. A., Terrile, R. J., 1984, *A circumstellar disk around Beta Pictoris*, Science, **226**, 1421
- [96] Smith, I., Ferrarri, A., Carbillet, M., Boccaletti, A., Fusco, T., Dohlen, K., Mouillet, D., Langlois, M., 2007, *An exoplanet detection algorithm for field-rotated coronagraphic images, and preliminary results for SPHERE*, Proc. SF2A 2007, 67
- [97] Soummer, R., Aime, C. and Falloon, P., 2003, *Stellar coronagraphy with prolate apodized circular apertures*, A&A, **397**, 1161
- [98] Soummer, R., Dohlen, K. and Aime, C., 2003, *Achromatic dual-zone phase mask stellar coronagraph*, A&A, **403**, 369
- [99] Soummer, R., 2005, *Apodized Pupil Lyot Coronagraphs for Arbitrary Telescope Apertures*, ApJ, **618**, L161
- [100] Soummer, R., Sivaramakrishnan, A., Oppenheimer, B. R., Macintosh, B. A., 2006, *The Gemini Planet Imager Apodized Pupil Lyot Coronagraph*, Bulletin of the American Astronomical Society, **38**, 1110

-
- [101] Tavrov, A. V., Otani, Yu., Kurokawa, T., Takeda, M., 2006, *Three-dimensional common-path interferometer for AIC : nulling of polychromatic light*, Proc. IAUC200, Cambridge University Press, 451
 - [102] Tosti, G., Busso, M., Nucciarelli, G., Bagaglia, M., Roncella, F., Mancini, A., Castellini, S., Mariotti, M., Babucci, E., Chiocci, G., Straniero, O., Dolci, M., Valentini, G., di Varano, I., Pelusi, D., Di Rico, G., Ragni, M., Abia, C., Domínguez, I., Corcione, L., Porcu, F., Conconi, P., De Caprio, V., Riva, A., Molinari, E., Zerbi, F. M., Bortoletto, F., Bonoli, C., D'Alessandro, M., Colomé, J., Isern, J., Briguglio, R., Cacciani, A., Farnesini, L., Checcucci, B., Strassmeier, K. G., 2006, *The International Robotic Antarctic Infrared Telescope (IRAiT)*, Proc. SPIE, **6267**, 62671H
 - [103] Valenziano, L., 2005, *Astronomical site quality in the sub-millimetric and millimetric bands at Dome C, Antarctica*, EAS Pub. Series 14, 25
 - [104] Vakili, F., Belu, A., Aristidi, E., Fossat, E., Maillard, A., Abe, L., Agabi, K., Vernin, J., Daban, J.-B., Hertmanni, W., Schmider, F.-X., Assus, P., Coude Du Foresto, V., Swain, M.R., 2004, *KEOPS : Kiloparsec Explorer for Optical Planet Search, a direct-imaging optical array at Dome C of Antarctica*, Proc. SPIE, **5491**, 1580V
 - [105] Venet, M., Enya, K., Abe, L., Nakagawa, T., 2006, *Development of laboratory experiment of Prolate Apodized Lyot Coronagraph*, Rapport de stage de Master 2 OMEGA, Université de Nice-Sophia Antipolis
 - [106] Watson, S. M., Mills, J. P., Gaiser, S. L., Diner, D. J., 1991, *Direct imaging of nonsolar planets with infrared telescopes using apodized coronagraphs*, Appl. Opt., **30**, 3253
 - [107] Wolszczan, A., Frail, D.A., *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, Nature, **355**, 145

Depuis 1995, et la confirmation de la détection de la première planète extrasolaire, la détection directe et la caractérisation spectrale d'une exoplanète sont devenues l'un des challenges astronomiques actuels. Cependant, le fort contraste existant entre l'étoile et la planète, 10^9 dans le visible et 10^6 dans l'infrarouge thermique dans le cas d'une exoTerre ou d'une exoJupiter ainsi que la faible séparation entre les deux objets rendent cette détection directe difficile et requièrent des techniques et des instruments à la pointe de la technologie. Une solution à cette problématique est la coronagraphie. D'une manière générale, un coronographe est un instrument dont l'objectif est d'atténuer le flux de l'étoile centrale en diminuant la diffraction instrumentale. J'ai étudié deux différents types de coronographes dans deux contextes totalement différents. J'ai tout d'abord étudié le coronographe de Lyot apodisé (ALC) destiné à l'instrument SPHERE (Spectro Polarimetric High contrast Exoplanet REsearch), instrument de seconde génération du VLT (Very Large Telescope) dédié à l'imagerie d'exoJupiter et dont la première lumière est prévue pour 2010. Je présente les différentes études relatives au développement de ce système coronographique menées lors de la post-phase A et la phase B de ce projet. Je me suis intéressé tout d'abord au composant novateur et important du coronographe de Lyot apodisé à savoir l'apodiseur, et, plus particulièrement, j'ai étudié par le calcul le chromatisme des propriétés optiques d'un apodiseur fabriqué par dépôt métallique d'un alliage d'Inconel sur un substrat de verre. Puis, afin de valider expérimentalement le concept et les procédés de fabrication retenus, j'ai ensuite caractérisé en laboratoire un premier prototype de coronographe de Lyot apodisé à $3\lambda/D$ sur le banc d'imagerie visible à très haute dynamique du laboratoire. J'ai ensuite participé aux études numériques de dimensionnement du prototype de l'ALC infrarouge susceptible d'être installé sur l'instrument. Je termine cette partie par la présentation des tests en laboratoire du prototype d'ALC infrarouge pour SPHERE, tests qui ont été réalisés sur le banc coronographique infrarouge du LESIA à l'Observatoire de Paris-Meudon. Le deuxième volet de ce manuscrit nous envoie dans un autre endroit particulier sur Terre sur un continent où les conditions atmosphériques sont quasi-spatiales : la station Concordia sur le plateau du Dôme C en Antarctique. C'est ici qu'a été implanté en décembre 2005, CORONA, le premier coronographe stellaire antarctique à couteaux de phase. Après une description de l'instrument et de ses motivations, je présente les tests en laboratoire du coronographe puis les résultats de la première lumière de l'instrument lors de la campagne d'été 2005 au Dôme C.

Mots clés : *Imagerie à très haute dynamique - Exoplanètes - Coronagraphie*

Since 1995, with the confirmation of the detection of the first extra-solar exo-planet, the direct detection and spectral characterization of an exo-planet became one of current astronomical challenges. However, the strong existing contrast between the star and the planet, 10^9 in the visible band and 10^6 in the thermal infrared band when it comes to exo-Earths or an Exo-Jupiter, as well as weak separation between the 2 objects makes direct detection hard to do. Plus it requires high technology techniques and instruments. One of the solutions for this problem is coronagraphs. In general, a coronagraph is an instrument that has for aim to attenuate the central star flux by reducing the instrumental diffraction. I studied two different types of coronagraphs related to two completely different contexts. I first studied the apodized Lyot coronagraph (ALC) destined for the SPHERE instrument (Spectro Polarimetric High contrast Exoplanet REsearch), a second generation instrument for the VLT (Very Large Telescope) dedicated to the imagery of an exo-Jupiter, which will probably see the light in 2010. I present the different studies relative to the development of this coronagraphic system conducted between the post-phase A and the B phase of this project. I was first interested in the innovative and important component of the apodized Lyot coronagraph, specially the apodizer, and more particularly I studied through calculations, the chromatics of the optic properties of an apodizer made by deposition of an Inconel metal alloy on a glass substrate. Then, in order to experimentally validate the concept and manufacturing processes used, I marked in laboratory the first prototype of the Apodized Lyot Coronagraph, apodized at $3\lambda/D$ on the laboratory's high dynamic visible imagery bench. I then participated in the numerical study of the prototype infrared ALC design likely to be installed on the instrument. I finish this part with the presentation of the tests in laboratory of the infrared ALC prototype for SPHERE; those tests were realized infrared coronagraphic bench of LESIA at the Paris-Meudon Observatory. The second part of this manuscript sends us to another particular place on earth where the atmospheric conditions are close the outer space : the Concordia station on the C Dome shelf on the Antarctic continent. This is where was planted CORONA in December 2005, the first Antarctic phase knife stellar coronagraph. After a description of the instrument and of its motivations, I will present laboratory tests of the coronagraphs then the results of the first light of the instrument during the 2005 summer campaign at Dome C.

Keywords : *High dynamics range imaging - Exoplanets - Coronagraphy*